

Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra telekomunikační techniky

**Vliv barevného pokovení na odrazivost světla, využití barevného
pokovení pro polopropustná zrcadla**

Influence of the colour deposition on the reflectivity of light, usage of
the colour deposition for the semipermeable mirrors

Zadání diplomové práce

Student:

Bc. Peter Grajciar

Studijní program:

N2647 Informační a komunikační technologie

Studijní obor:

2601T013 Telekomunikační technika

Téma:

Vliv barevného pokovení na odrazivost světla, využití barevného
pokovení pro polopropustná zrcadla
Influence of the colour deposition on the reflectivity of light, usage of
the colour deposition for the semipermeable mirrors

Jazyk vypracování:

čeština

Zásady pro vypracování:

Tenké vrstvy kovových materiálů jsou používány jako barevné filtry, protože ovlivňují spektrální složení světla. Významný vliv na spektrální složení má mimo jiné podkladový materiál a jeho teplota. Pro vypracování DP se řiďte těmito body:

1. Popište teoreticky chování tenkých kovových vrstev na dielektrickém materiálu.
2. Navrhněte a realizujte experimentální sestavu pro měření spektrální odrazivosti.
3. Změřte spektrální odrazivost kovových vrstev na vzorcích dodaných společností Varroc Lightning.
4. Experimentálně ověřte změny spektrálního chování při změnách teploty.

Seznam doporučené odborné literatury:


- [1] Saleh, B.E.A., Teich, M.C. > Fundamentals of Photonics. J.Wiley and Sons., New Jersey 2007, ISBN: 978-0-471-35832-9.
[2] Podle pokynů vedoucího diplomové práce

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **prof. RNDr. Vladimír Vašínek, CSc.**

Datum zadání: 01.09.2018

Datum odevzdání: 30.04.2019


prof. Ing. Miroslav Vozňák, Ph.D.
vedoucí katedry




prof. Ing. Pavel Brandštetter, CSc.
děkan fakulty

Prehlásenie študenta

Prehlasujem, že som túto diplomovú prácu vypracoval samostatne. Uviedol som všetky literárne pramene a publikácie, z ktorých som čerpal.

V Ostrave dňa: 26. apríla 2019


.....
Podpis autora

Pod'akovanie

Týmto chcem vysloviť pod'akovanie prof. RNDr. Vladimírovi Vašinkovi, CSc. za odbornú pomoc, konzultáciu pri vytváraní tejto práce a rovnako by som sa chcel pod'akovať spoločnosti Varroc Lighting Systems s.r.o. za poskytnutie prostriedkov potrebných k meraniu, obzvlášť Ing. Jakubovi Veselému. V neposlednej rade mojej priateľke a rodine, ktorí má celý čas podporovali.

Prohlášení zástupce spolupracující právnické nebo fyzické osoby

„Souhlasím se zveřejněním této diplomové práce dle požadavků čl. 26, odst. 9 Studijního a zkušebního řádu pro studium v bakalářských/magisterských programech VŠB-TU Ostrava.“

Dne: 24.dubna 2019


.....
podpis zástupce

Abstrakt

Cieľom tejto práce je zistiť optické vlastnosti tenkých vrstiev dodaných firmou Varroc Lighting Systems s.r.o.. Jedná sa konkrétne o polykarbonátový substrát pokovený vrstvou hliníka, chrómu, prípadne kombináciou oboch kovových materiálov. V práci sú popísané potrebné teoretické poznatky k základnému fungovaniu tenkých vrstiev, technologické typy výroby tenkých vrstiev a v krátkosti využitie tenkých vrstiev v automobilovom priemysle. Úlohou praktickej časti je navrhnúť experimentálnu zostavu pre meranie spektrálnej odrazivosti a následne zmerať túto vlastnosť na vzorkách dodaných spomenutou firmou. Práca taktiež obsahuje overenie zmien spektrálneho chovania pri zahrievaní vzoriek. Okrem týchto meraní sa práca venuje aj ostatným optickým vlastnostiam ako je priepustnosť, absorpcia alebo teplota chromatičnosti. Práca obsahuje grafické slovné vyhodnotenia a záver.

Kľúčové slová:

tenké vrstvy, odrazivosť, priepustnosť, spektrum, chromatičnosť, pokovovanie, polykarbonát, chróm, hliník, automobilový priemysel, fotometria

Abstract

The aim of this thesis is to find out the optical properties of thin films supplied by Varroc Lighting Systems Ltd. This is a polycarbonate substrate coated with a layer of aluminum, chromium or a combination of both metal materials. The thesis describes the necessary theoretical knowledge for the basic functioning of thin films, the technological types of thin film production and in short the use of thin films in the automotive industry. The task of the practical part is to design an experimental set for spectral reflectance measurement and then measure this property on the samples supplied by Varroc Lighting Systems. The work also includes verification of spectral behavior changes during heating the samples. In addition to these measurements, other optical properties such as permeability, absorption or color temperature are also addressed. The thesis contains graphical verbal evaluations and the conclusion.

Keywords:

Thin Films, Reflectivity, Transmittance, Spectrum, Chromaticity, Deposition, Polycarbonate, Chromium, Aluminum, Automotive, Photometry

Zoznam použitých symbolov

Symbol	Jednotky	Význam symbolu
W	K^{-1}	Energia fotónu
h	J.s	Plancková konštanta
v	Hz	Frekvencia
v_{λ}	$m \cdot s^{-1}$	Rýchlosť šírenia svetla
c	$m \cdot s^{-1}$	Rýchlosť šírenia svetla (vo vákuu)
k	m^{-1}	Vlnový vektor
n	[-]	Index lomu
λ	nm	Vlnová dĺžka
$d\Omega$	°	Priestorový uhol
Φ	lm	Svetelný tok
Φ_e	W	Žiarivý tok
E	lx	Osvetlenosť
I	cd	Svietivosť
L	$cd \cdot m^{-2}$	Jas

Zoznam použitých skratiek

Skratka	Význam
CVD	Chemical Vapor Deposition
HUD	Head Up Display
LED	Light Emitting Diode
OLED	Organic Light Emitting Diode
PC	Polycarbonate
PEP	Polyethylene Propylene
PVD	Physical Vapor Deposition
UV	Ultraviolet

Obsah

Zoznam použitých symbolov	8
Zoznam použitých skratiek	9
Úvod	- 12 -
1 Základné vlastnosti svetla	- 13 -
1.1 Základné fotometrické veličiny.....	- 14 -
1.1.1 Jas	- 14 -
1.1.2 Svetelný tok.....	- 15 -
1.1.3 Intenzita	- 16 -
1.1.4 Priestorový uhol	- 16 -
1.1.5 Svietivosť	- 17 -
1.2 Farby a kolorimetria.....	- 17 -
1.2.1 Ľudské oko	- 17 -
1.2.2 CIE XYZ – Kolorimetria.....	- 18 -
1.2.3 Kolorimetria v automobilovom priemysle	- 20 -
1.2.4 Teplota chromatičnosti	- 20 -
1.3 Vlnové a Maxwellové rovnice	- 21 -
1.4 Polarizácia svetla.....	- 23 -
1.5 Interferencia	- 24 -
1.6 Koherencia	- 24 -
1.7 Zákony geometrickej optiky	- 25 -
1.7.1 Index lomu.....	- 25 -
1.7.2 Zákon odrazu a lomu svetla.....	- 26 -
1.7.3 Odraz svetla na kovoch	- 27 -
2 Tenké vrstvy.....	- 29 -
2.1 História tenkých vrstiev	- 29 -
2.2 Princíp fungovania tenkých vrstiev.....	- 29 -
2.3 Technológie výroby tenkých vrstiev	- 32 -
2.3.1 Fyzikálna depozícia - PVD.....	- 32 -
2.3.2 Chemická depozícia - CVD.....	- 33 -
2.4 Typy tenkých vrstiev.....	- 34 -
2.4.1 Protiodrazové tenké vrstvy	- 34 -

2.4.2	Odrazové tenké vrstvy	35 -
2.4.3	Interferenčné tenké vrstvy	36 -
2.5	Tenké kovové vrstvy na polykarbonátovom substráte	36 -
2.5.1	Polykarbonát (PC)	36 -
2.5.2	Chróm	36 -
2.5.3	Hliník	36 -
2.6	Aplikácie tenkých vrstiev v automobilovom priemysle	36 -
2.6.1	Ochranné vrstvy	37 -
2.6.2	HUD displej	37 -
3	Praktická časť	39 -
3.1	Popis používaných prístrojov a referenčných vzorkov	39 -
3.1.1	Halogénový zdroj	39 -
3.1.2	Spektrometer Ocean Optics USB 4000	39 -
3.2	Popis meraných tenkých vrstiev	39 -
3.3	Overenie homogenity vzoriek optickými spôsobmi	42 -
3.4	Merania spektrálnej odrazivosti	43 -
3.5	Merania spektrálnej odrazivosti pri teplotnom zaťažovaní	48 -
3.6	Merania priepustnosti transparentných vzoriek	50 -
3.6.1	Výpočet absorpcie	51 -
3.7	Meranie chromatičnosti	53 -
3.8	Polarizačné merania	56 -
Záver	57 -
Použitá literatúra	59 -
Zoznam príloh	I

Úvod

Téma diplomovej práce sa zaoberá optickými vlastnosťami farebného pokovenia na substráte, inými slovami aj tenkých vrstiev a ich prípadnou implementáciou do nových oblastí svetlometov v automobilovom priemysle. V tomto odvetví existuje niekoľko spoločností, ktoré sa zaoberajú vývojom a výrobou svetlometov do automobilov a tým pádom tu prirodzene dochádza ku konkurencii jednotlivých firiem najmä čo sa týka kvality, ceny a v neposlednom rade novými technológiami a inováciami. Vývoj svetlometov sa v posledných rokoch posunul rapídne dopredu, medzi najväčší posun je možno považovať LED technológiu, ale aj novšie inovácie ako OLED technológia alebo tzv. Surface LED, ktorý vyvíjali práve odborníci z firmy Varroc Lighting Systems s.r.o.. Aj napriek novým technológiám a výzvam sa riešenia stretávajú často s vysokými nárokmi. Patria napríklad technologické, bezpečnostné, predpisové a takisto aj cenové požiadavky.

Medzi typické vlastnosti jednotlivých automobilových značiek patrí aj dizajn a k tomu sa takisto musia prispôbiť aj firmy vyrábajúce svetlomety, na ktoré je aj v tejto oblasti kladený čoraz väčší dôraz. Medzi tieto firmy patrí aj firma Varroc Lighting Systems s.r.o., ktorá sa zaoberá práve výrobou v oblasti automobilového priemyslu s prioritným zameraním na osvetľovacie časti pre automobily, prípadne iné motorové prostriedky.

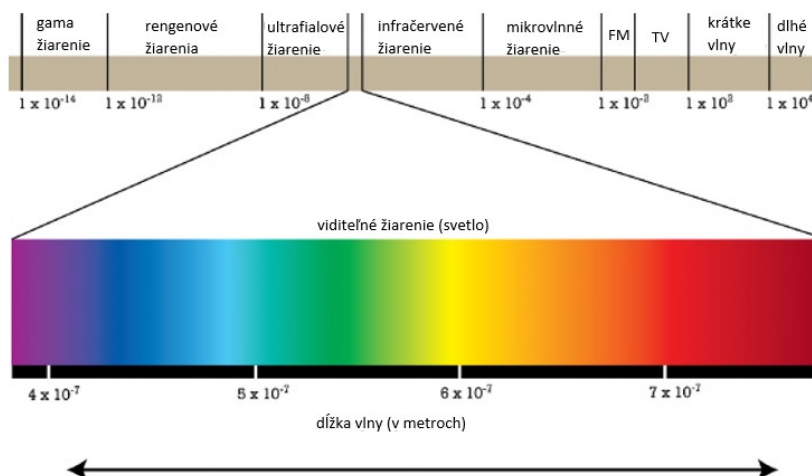
Tenké vrstvy sú využívané v mnohých oblastiach pre ich špecifické vlastnosti, či už sa jedná o ochranu substrátu pred rôznymi vonkajšími vplyvmi alebo o potrebu zmien optických vlastností substrátov, na ktorý sú tieto vrstvy nanosené. V určitých oblastiach sa vrstvy môžu použiť aj ako dizajnový prvok, zaujímavým materiálom býva v takýchto prípadoch kovový materiál chróm, ktorý je používaný aj v spomínanej firme. V súčasnosti sú plochy svetlometov najčastejšie pokovované hliníkom a to vďaka výborným optickým vlastnostiam a cene. Plochy pokovované chrómom momentálne nie sú časti svetlometu, ktoré by ovplyvňovali fotometriu danej funkcie. Práve chróm a jeho farebné vlastnosti môžu priniesť opäť prínos v dizajne a atraktivite svetlometov v automobilovom priemysle. Napriek tomu je potrebné poznať optické vlastnosti z dôvodu splnenia rôznych noriem a predpisov.

Teoretická časť práce sa zaoberá popisom svetla, či už ako elektromagnetické žiarenie vo viditeľnom spektre alebo v oblasti geometrickej optiky a ich základnými vlastnosťami. Tieto poznatky sú dôležité pre pochopenie fungovania rôznych typov vrstiev, či už tenkých alebo hrubých. Fungovanie týchto vrstiev, ich využitie a merania sú popísané v druhej polovici teoretickej časti.

Praktická časť sa zaoberá meraniami vzoriek dodaných firmou Varroc Lighting Systems s.r.o.. Tieto vzorky boli pokovené v závode danej firmy a jedná sa o vzorky polykarbonátového (ďalej iba PC) substrátu, na ktorý boli nanosené vrstvy buď hliníka, chrómu alebo prípadne oboch materiálov. Vzorky sa líšili rôznymi parametrami pri výrobe a vzorky chrómu sa líšia aj vizuálne. Preto sa pri týchto vzorkách merali optické vlastnosti, prioritne spektrálna odrazivosť a následne jej závislosť pri teplotnom zaťažovaní vzoriek. Ďalšou meranou vlastnosťou bola priepustnosť, ktorá sa merala iba v prípade transparentných vzoriek. Vďaka spektrálnej odrazivosti a priepustnosti konkrétnej vzorky je možné určiť jej približný absorpčný koeficient. Ďalším meraním, ktoré je veľmi dôležité v osvetľovacej technike v automobilovom priemysle je teplota chromatičnosti a jej súradnice. Tieto hodnoty boli taktiež zmerané a vyhodnotené. Posledným meraním bolo chovanie polarizácie svetla pri odraze od týchto vzoriek.

1 Základné vlastnosti svetla

Ako je známe, viditeľné žiarenie je iba malou časťou z celého rozsahu elektromagnetického vlnenia a to v rozmedzí približne od 400 nm do 800 nm. Tento rozsah vlnových dĺžok pôsobí na sieťnicu ľudského oka. Žiarenie týchto vlnových dĺžok sa nazýva viditeľným žiarením alebo jednoducho svetelné žiarenie [1].



Obrázok 1.1: Elektromagnetické spektrum

Vedný odbor optika, prípadne svetlo ako také môžeme popísať tromi rozličnými spôsobmi a to buď ako spektrum elektromagnetických vln, ďalej z pohľadu fotónov a nakoniec aj ako lúče, teda pomocou geometrickej optiky.

Z pohľadu elektromagnetických vln je popísané šírenie svetla pomocou Maxwellových rovníc. Z týchto rovníc dokážeme dostať vlnovú rovnicu a aký má tvar pre rôzne prostredia. V tomto kontexte je možné prostredie rozdeliť na prostredie homogénne, nehomogénne, izotropné a anizotropné. Homogénne prostredia sú také, ktorých vlastnosti sú vo všetkých miestach rovnaké, nezávisia na priestorovej súradnici. V prostrediach nehomogénnych naopak na priestorovej súradnici závisí. Izotropné látky majú vlastnosti nezávislé na smere (šírenie svetla, polarizácia), v anizotropných sú ich vlastnosti na smere závislé [1]. Vlnovým vlastnostiam svetla sa detailnejšie zaoberá kapitola 1.3.

Vyššie uvedené vlastnosti svetla sa prejavujú najmä polarizáciou, interferenciou a difrakciou. Toto však neplatí, ak o svetle uvažujeme ako o vyžarovaní, čiže emisii svetla alebo s jeho absorpciou. V roku 1926 G. N. Lewis nazval kvantá energie ako fotóny. Táto fotónová optika zachováva vlnový charakter svetla, ale s tým rozdielom, že energia je kvantovaná, teda dve najbližšie hodnoty energie sa odlišujú iba o energiu fotónu. Energiu fotónu získame pomocou vzorca:

$$W = h\nu \quad (1.1)$$

kde ν je frekvencia svetla a h je univerzálna Plancková konštanta a jej hodnota je $6,625 \cdot 10^{-34}$ J.s. Okrem energie má každý fotón aj impulz p . Pri rovinnom vlnení platí,

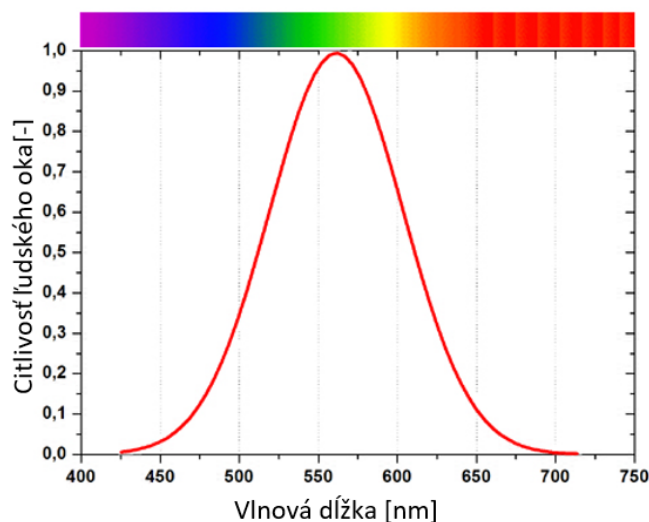
$$p = \hbar k \quad (1.2)$$

kde k označuje vlnový vektor a $\hbar = h/2\pi$ [2].

Na svetlo sa dokážeme pozrieť aj ako na lúče, v tomto prípade hovoríme o tzv. geometrickej optike, ktorá sa zaoberá šírením svetla v prostrediach, ktorého rozmery sú v porovnaní s vlnovou dĺžkou svetla výrazne väčšie. Zanedbáva vlnovú povahu svetla a využíva princípy priamočiareho šírenia svetla, vzájomnej nezávislosti chodu svetelných lúčov alebo taktiež zákonom lomu a odrazu. Jedným z najdôležitejších parametrov v tomto type optiky je základná veličina index lomu, ktorú označujeme ako n . Popis tejto veličiny, ako aj ostatné zákony geometrickej optiky sú popísané v kapitole 1.7 [3].

1.1 Základné fotometrické veličiny

Ako detektor môžeme považovať aj ľudské oko, ktoré dokáže reagovať na intenzitu svetelného vlnenia vo viditeľnom spektre žiarenia. Detekcia svetla okom nezávisí iba od intenzity dopadajúceho svetla na oko, ale najmä od vlnovej dĺžky a od toho či sa jedná o denné alebo nočné videnie. Citlivosť na svetlo a na konkrétne vlnové dĺžky môže byť u ľudí odlišná, preto nie je možné určiť vlnovú dĺžku, na ktorú oko reaguje najcitlivejšie, napriek tomu bola definovaná krivka citlivosti normálneho ľudského oka $V(\lambda)$. Najcitlivejšia časť u tejto krivky prislúcha vlnovej dĺžke 555 nm [2] (obr. 1.2).



Obrázok 1.2: Citlivosť oka na vlnové dĺžky vo viditeľnom spektre

Fotometria sa zaoberá meraním svetla, tj. viditeľného elektromagnetického žiarenia. Jeho zmyslom je kvantifikovať svetelné veličiny tak, ako ich vníma ľudské oko, preto je v jeho jednotkách citlivosť oka zohľadnená. Zaoberá sa preto iba elektromagnetickým žiarením vo viditeľnej časti spektra [1]. V ďalších podkapitolách budú stručne vysvetlené fotometrické veličiny ktorými sa fotometria zaoberá.

1.1.1 Jas

Technická veličina, konkrétne sa jedná o jas svetelných lúčov, na ktorú zrakový orgán okamžite reaguje. Táto veličina je určená priestorovou a plošnou hustotou svetelného toku prenášaného lúče podľa vzťahu:

$$L_{OP} = \frac{d^2\Phi}{d\Omega_1 dA_n} (cd \cdot m^{-2}; lm, sr, m^2) \quad (1.3)$$

kde L_{OP} je jas zväzku lúčov v smere osy optického zväzku, $d\Omega$ je priestorový uhol, v ktorom sa lúče šíria a dA_n je ploška kolmá k ose zväzku lúčov, na ktorú sa prevádza plošná hustota svetelného toku.

Svetelný tok prenášaný zväzkom svetelných lúčov od bodu k bodu, v najkratšom možnom čase sa úmerne mení so zmenou svetelného toku a mení sa aj jas lúču a to vplyvom prostredia, ktoré môže svetlo pohlcovať, vyžarovať alebo rozptyľovať. Pokiaľ vymedzíme zväzok lúčov dvoma otvormi, ktoré budú mať veľkosť plochy dA_1 a dA_2 v ľubovoľne zvolených miestach na tienidlách A_1 a A_2 vyplývajú z rovnice (1.3) tieto vzťahy:

- Pre jas L_{OP} zväzku lúčov zbíhajúcich sa v priestorovom uhle $d\Omega_1 = dA_1 \cos \gamma l^2$ z plošky dA_1 do bodu P . Teda od zdroja v smere fotonky alebo oka pozorovateľa.

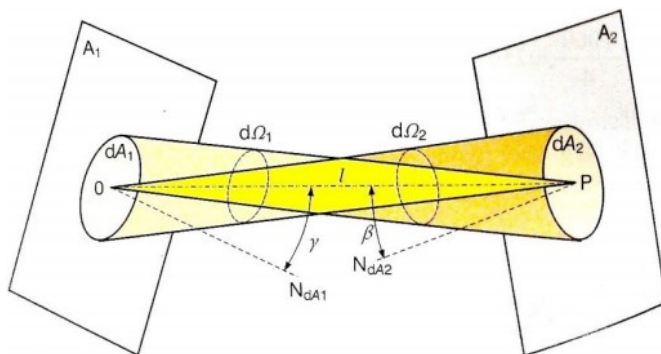
$$L_{OP} = \frac{d^2\Phi}{d\Omega_1 dA_2 \cos \beta} = \frac{dE_N}{d\Omega_1} (cd \cdot m^{-2}; lm, sr, m^2; lx, sr) \quad (1.4)$$

kde dE_N označuje normálovú osvetlenosť, čo je intenzita priemetu plošky dA_2 do roviny kolmej k lúču l .

- Pre jas $L_{OP} = L_\gamma$ zväzku lúčov rozbiehajúcich sa v priestorovom uhle $d\Omega = dA_2 \cos \beta l^2$ z bodu O

$$L_{OP} = \frac{d^2\Phi}{d\Omega_2 dA_1 \cos \beta} = \frac{dI_\gamma}{dA_1 \cos \gamma} (cd \cdot m^{-2}; lm, m^2, sr; cd, m^2) \quad (1.5)$$

kde $dI_\gamma = d\Omega / d\Omega_2$ je svietivosť plošky dA_1 v smere pod uhlom γ od normály N_{dA_1} .



Obrázok 1.3: Vymedzenie zväzku zbíhajúcich a rozbiehajúcich lúčov

V homogénom, nerozptyľujúcom a nepohlcujúcom prostredí je jas zväzku lúčom na celej jeho dráhe rovnaký a teda nezávislý na vzdialenosti od svetelného zdroja. Jednotkou jasu je kandela na meter štvorcový [4].

1.1.2 Svetelný tok

Táto fotometrická veličina odpovedá žiarivému toku a vyjadruje spôsobilosť žiarivého toku vyvolať zrakový vnem. Jednotkou svetelného toku je jeden lumen. Svetelný tok označovaný ako Φ monochromatického žiarenia vlnovej dĺžky α , ktorého žiarivý tok je Φ_e je definovaný vzťahom:

$$\Phi(\gamma) = K(\gamma)\Phi_e(\gamma) = K_m V(\gamma)\Phi_e(\gamma) \quad (lm; lm \cdot W^{-1}, -, W) \quad (1.6)$$

Veličina $K(\gamma)$ ($\text{lm} \cdot \text{W}^{-1}$) vyjadruje svetelný účinok monochromatického žiarenia rovný pomeru svetelnému toku a jemu odpovedajúceho žiarivého toku. Väčšinou sa veličina $K(\gamma)$ vyjadruje súčinom pomerom účinností $V(\gamma)$ monochromatické žiarenia a súčinom maximálnej hodnoty spektrálneho priebehu veličiny $K(\gamma)$ podľa vzťahu:

$$K(\gamma) = K_m V(\gamma) \quad (1.7)$$

pričom $V(\gamma)$ je pomerná svetelná účinnosť monochromatického žiarenia definovaná vzťahom:

$$V(\gamma) = \frac{K(\gamma)}{K_m} \quad (-; \text{lm} \cdot \text{W}^{-1}, \text{lm} \cdot \text{W}^{-1}) \quad (1.8)$$

Z pozície individuálneho pozorovateľa je veličina $V(\gamma)$ rovnaká s pomernom spektrálnou citlivosťou pozorovateľa. V základnej sústave SI sa jednotky svetelne technických veličín odvodzujú od základnej jednotky svietivosti (jedna kandela), tj. od svietivosti zdroja žiarenia o frekvencii 540 THz, pri žiarivosti zdroja v danom smere $1/683 \text{ W} \cdot \text{sr}^{-1}$ [4].

1.1.3 Intenzita

Osvetlenosť, alebo aj intenzita osvetlenia E , rovinatej plošky dA , vyjadruje svetelný tok, ktorý dopadá na osvetľovanú plochu. Z definície plynie, že plošná hustota svetelného toku $d\Phi_d$, dopadajúca na plošku dA je daná vzťahom:

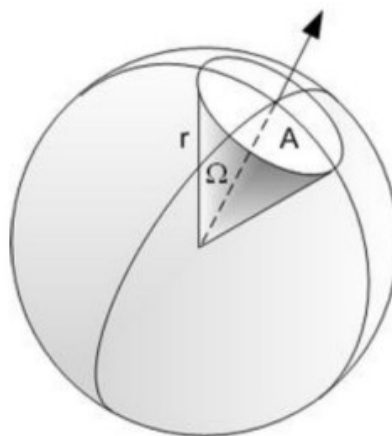
$$E = \frac{d\Phi_d}{dA} \quad (\text{lx}, \text{lm}, \text{m}^2) \quad (1.9)$$

Osvetlenosť plošky dA sa taktiež nazýva aj osvetlenosťou v bode, ktorého elementárne okolie v uvažovanej rovine vytvára ploška dA . Jednotkou osvetlenosti je jeden lux (lx). V praxi je to dôležitý parameter, ktorý si zákazník žiada v zadaní pri požiadavke na výrobu svetla [4].

1.1.4 Priestorový uhol

Časť priestoru ohraničená rotačnou kužeľovou plochou. Vyjadruje pomer medzi plochou vytýčenou kužeľom na povrchu gule (A) ku kvadrátu polomeru danej gule (r). Tento pomer je pre daný kužeľ nemenný (zmenší sa polomer, zmenší sa aj vytýčená plocha). Jednotkou je steradián a označuje sa grécky písmenom Omega.

$$\Omega = \frac{A}{r^2} \quad (1.10)$$



Obrázok 1.4: Definícia priestorového uhla [4]

1.1.5 Svietivosť

Analogická veličina k žiarivosti, označuje sa ako I a jednotkou je kandela. Zaraďuje sa medzi základné jednotky sústavy SI. Je definovaná ako svietivosť monochromatického žiarenia o frekvencií $540 \cdot 10^{12}$ Hz (vlnová dĺžka 555,2 nm) a žiarivosťou 1,46 mW. Vzťah pre výpočet svietivosti [4]:

$$I = K \int_0^\infty \hat{I}(\lambda) V(\lambda) d\lambda \quad (1.11)$$

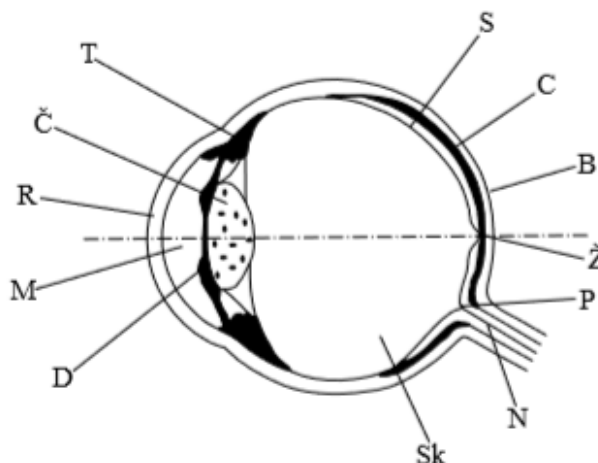
1.2 Farby a kolorimetria

Svetelné žiarenie vo viditeľnom spektre elektromagnetického žiarenia dokáže v ľudskom oku vyvolať zrakový vnem a následne aj rozlišovať jednotlivé farby a odtiene. Tento vyvolaný vnem nie je iba fyzikálneho charakteru, ale záleží aj od psycholofyziologického stavu pozorovateľa, v stave únavy zoslabuje a naopak pri nebezpečných situáciách zosilňuje.

Pojem farba sa bežne prenáša aj na vlastnosť svetla a materiálneho objektu a teda sa hovorí o farbe svetla alebo o farbe predmetu. Presnejší názov pre vlastnosti svetla sa označuje názvom chromaticnosť. Farba svetla je určená spektrálnym zložením a jeho intenzita nie je dôležitá. Farba ako taká je iba vnem, vznikajúci v ľudskom mozgu ako reakcia na svetlo, ktoré dopadá na sietnicu oka. Oveľa jednoduchšie a praktickejšie je však tvrdiť, že svetlo má farbu [2,5].

1.2.1 Ľudské oko

Ľudské oko má približne guľový tvar s priemerom približne 24 mm a nachádza sa v dutine, ktorá mu dovoľuje otáčavé pohyby. Oko ako také sa skladá z množstva častí, ako je vidieť na obrázku 1.5.



Obrázok 1.5: Štruktúra ľudského oka [6]

Zrakový vnem vzniká tak, že zväzky lúčov prichádzajúce do oka z vonkajších predmetov sa spájajú s optickou sústavou oka na sietnici, kde sa stretávajú s citlivými bunkami. V sietnici sú uložené dva druhy buniek citlivých na svetlo: tyčinky a čapíky. Tyčinky vykazujú citlivosť na svetlo, ale všetky druhy farieb vnímajú ako šedomodré. Citlivosť čapíkov na svetlo je menšia, ale práve čapíky rozoznávajú farbu svetla. Tyčinky a čapíky nie sú na sietnici rovnomerne rozložené, v žltej škvrne prevládajú čapíky a ďalej odtiaľ pribúdajú tyčinky. Oko vždy zaujme takú polohu, aby obraz najdôležitejších častí predmetu padol na žltú škvrnu.

Oko nemá rovnakú citlivosť na všetky farby, najcitlivejšie je na žltozelené svetlo o vlnovej dĺžke = 555 nm pre denné videnie. Pre nočné videnie je ľudské oko najcitlivejšie na vlnovú dĺžku = 507nm [6].

1.2.2 CIE XYZ – Kolorimetria

V roku 1931 medzinárodná komisia pre osvetľovanie Commission internationale de l'éclairage, skrátene CIE, akceptovala päť doporučení, ktoré položila ako základ pre moderné meranie farebnosti. CIE 1931 doteraz tvorí základ matematického a fyzikálneho a predovšetkým objektívneho vyjadrenia farby. Táto štúdia vychádza z CIE RGB. Definícia farieb podľa CIE 1931 sa skladá podľa X, Y, Z, parametrov. Jas je vyjadrený hodnotou Y a farby s týmto jasom sú usporiadané v chromatickom diagrame (obrázok 1.6). Odtiene sú rozložené pozdĺž obidvoch diagramov, sýtosť sa za pohybu mení smerom k centrálnej neutrálnej oblasti. Farby s rovnakým odtieňom ležia na priamke spájajúcej bod na obvoде trojuholníka a bod odpovedajúci bielej farbe. V tomto zobrazení nie je znázornená svetlosť. Tieto odvodené parametre je možné dopočítať z trichromatických zložiek x, y a z, podľa nasledujúcich vzťahov, ktoré sú nazývané ako farebné súradnice a sú definované takto:

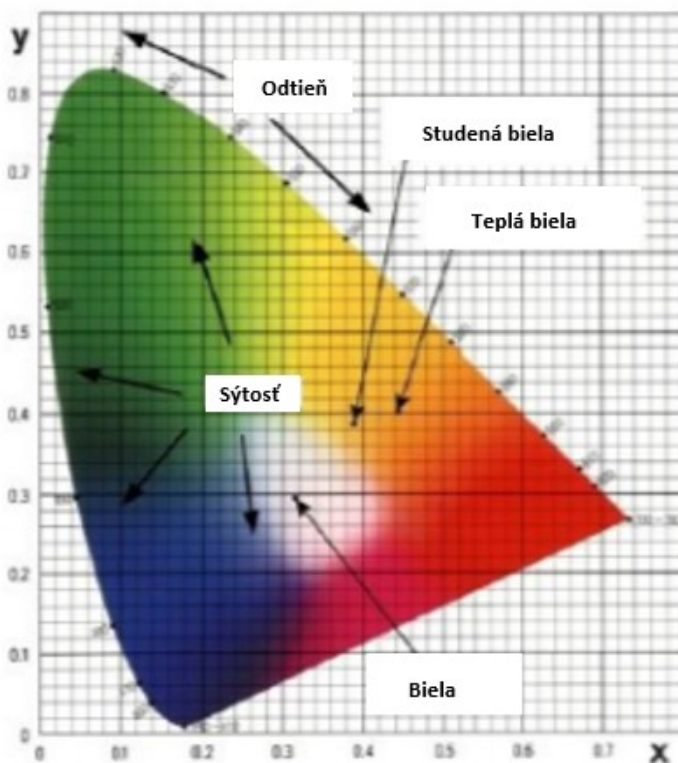
$$x = \frac{X}{X+Y+Z} \quad (1.12)$$

$$y = \frac{Y}{X+Y+Z} \quad (1.13)$$

$$z = \frac{Z}{X+Y+Z} \quad (1.14)$$

$$x + y + z = 1 \quad (1.15)$$

Výrobcovia pri klasifikácii LED do farebných binov uvádzajú v katalógových listoch súradnice x a y , ktoré sa vzťahujú na farebný dvojrozmerný priestor CIE xy , čo je jednotkový trojuholník XYZ premietnutý do roviny XY .



Obrázok 1.6: Chromatický diagram CIE 1931 [7]

Ďalšia hodnota v katalógovej dokumentácii je svetelný tok, čo v CIE 1931 predstavuje parameter Y . Pre získanie kompletných súradníc X, Y a Z parametrov uvedených v katalógovej dokumentácii je možné využiť nasledujúce vzťahy.

$$X = x \frac{Y}{y} \quad (1.16)$$

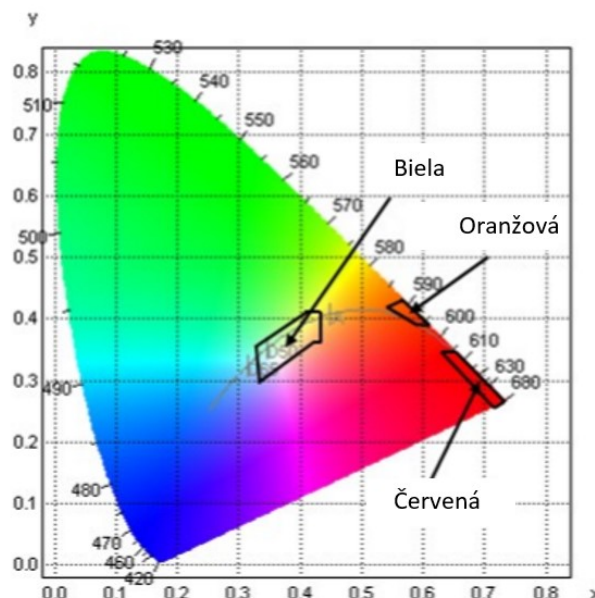
$$Y = \Phi \quad (1.17)$$

$$Z = \frac{Y}{y} (1 - x - y) \quad (1.16)$$

Hodnoty x, y predstavujú súradnice odpovedajúce vybranému bodu vo farebnom priestore CIE 1931 na obrázku 1.6 a Φ prezentuje hodnotu svetelného toku [7].

1.2.3 Kolorimetria v automobilovom priemysle

Je prirodzené, že v automobilovom priemysle nie je dovolené používať pre svetelné funkcie výkonové zdroje akýchkoľvek farieb a zároveň ani svetlo z takýchto osvetľovacích funkcií nesmie byť vyžarované v inej farbe, ako dovoľujú predpisy. V tomto prípade môže emitovať svetlo iba v určitých oblastiach chromatického diagramu CIE 1931, ako je možné vidieť aj na nasledujúcom obrázku.



Obrázok 1.7: Oblasť povolených farebných odtieňov v automobilovom priemysle

Farebné žiarenie zároveň musí byť zvolené na základe toho, aká funkcia bude použitá v danom svetlomete.

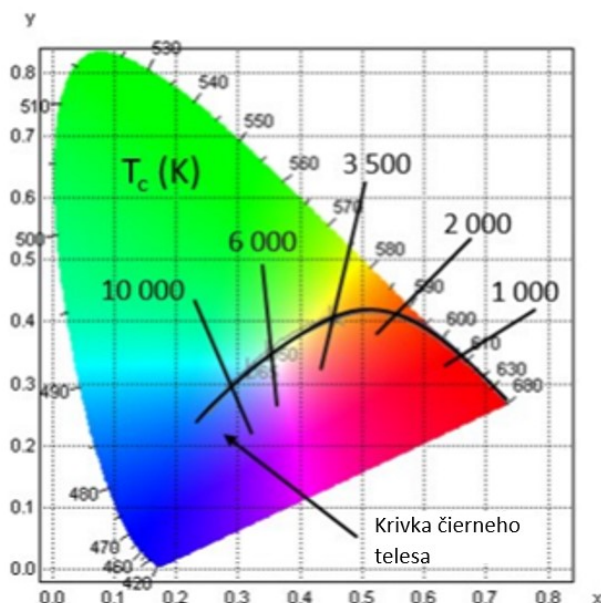
- Biela oblasť – používa sa predovšetkým v predných automobilových lampách ako zdroje pre obrysové funkcie, funkcie pre denné svietenie, diaľkové svetlá, predné hmlové svetlá či v zadnej časti automobilu pre cúvacie osvetľovacie funkcie.
- Oranžová oblasť – Využíva sa v predných aj v zadných automobilových lampách ako smerová signálna funkcia
- Červená oblasť – používa sa iba v zadných automobilových lampách k plneniu zadnej obrysovej funkcie, brzdovej funkcie a zadných hmlových funkcií [5].

1.2.4 Teplota chromatičnosti

Okrem farby a odtieňa je možné objektívne popísať svetlo na základe teploty chromatičnosti. Farebná teplota, ako sa taktiež označuje, má aj skrátené označenie CCT. Táto fyzikálna veličina popisuje vo farebnom spektre, ako sa predovšetkým biele svetlo javí pre pozorovateľa. Pokiaľ v sebe skrýva tóny žltých, či oranžových farieb, hovoríme, že ide o svetlo teplej farby. Pokiaľ biele svetlo obsahuje zložky modrej farby, v takomto prípade hovoríme že ide o svetlo studenej farby.

Teplota chromatičnosti sa meria v kelvinoch (K). Svetlo o určitej farebnej teplote má farbu tepelného žiarenia vydávané čiernym telesom, zahriatým na túto teplotu. Čierne teleso je teoretický predmet, ktorý absorbuje celé elektromagnetické žiarenie, ktoré na neho dopadá. Zdá sa čierne, pretože

neodráža svetlo. Akonáhle je ale čierne teleso zahrievané, jeho farba sa postupne zmení z čiernej na červenú a postupne až do modrej. Zmena farebných súradníc tohto spektra farieb definuje krivku čierneho telesa vo farebnom priestore CIE 1931 na obrázku 1.8 [5].



Obrázok 1.8: Krivka teploty chromatičnosti [5]

1.3 Vlnové a Maxwellové rovnice

Šírenie svetla, teda úzke spektrum elektromagnetických vln popisuje vlnová rovnice, ktorá plynie z Maxwellových rovníc. Z Maxwellových rovníc je možné určiť vlnovú rovnicu pre rôzne prostredia. V tomto kontexte je možné prostredia rozdeliť na prostredia homogénne, nehomogénne, izotropné, anizotropné, vodivé a nevodivé. Homogénne prostredie je také, ktorého vlastnosti sú vo všetkých miestach rovnaké, nezávisí na priestorovej súradnici. U nehomogénnych prostrediach naopak na priestorovej súradnici závisí. Izotropné látky majú vlastnosti nezávislé na smere (šírenia svetla, polarizácie a pod.), v anizotropných sú ich vlastnosti na smere závislé. Maxwell určil štyri základné rovnice.

$$\nabla \times \vec{E} + \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = 0 \quad (1.17)$$

$$\nabla \times \vec{H} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} = \vec{j} \quad (1.18)$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho \quad (1.19)$$

$$\nabla \times \vec{B} = 0 \quad (1.20)$$

d'alej je potrebné poznať obvyklé materiálové vzťahy,

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (1.21)$$

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P} \quad (1.22)$$

$$\vec{j} = \sigma \vec{E} \quad (1.23)$$

pričom veličina \vec{E} je intenzita elektrického poľa, \vec{D} je elektrická indukcia, \vec{H} je magnetická intenzita, \vec{B} je magnetická indukcia, \vec{P} je elektrická polarizácia, \vec{j} je hustota elektrického prúdu, $\vec{\rho}$ je hustota elektrického náboja, $\vec{\mu}$ je magnetická permeabilita, ϵ_0 je permitivita vákua a σ je elektrická vodivosť. Predpokladajme v ďalších prípadoch so šírením svetla v nemagnetických látkach, teda $\mu = \mu_0$ a rovnako lineárnu závislosť polarizácie na elektrickom poli, teda

$$\vec{P} = \epsilon_0 \vec{\chi} \vec{E} \quad (1.24)$$

kde $\vec{\chi}$ je elektrická susceptibilita (tenzor) a odkiaľ je:

$$\vec{D} = \epsilon_0 (1 + \vec{\chi}) \vec{E} = \vec{\epsilon} \vec{E} \quad (1.25)$$

Permitivita $\vec{\epsilon}$ je obecné tenzorová veličina závislá na priestorových súradniciach. Výraz (1.25) definuje relatívnu permeabilitu, $(1 + \vec{\chi}) = \epsilon_r$. Vlastnosti permitivity podľa typu sú zahrnuté v tabuľke.

Tabuľka 1.1: *Prehľad klasifikácie prostredí a odpovedajúci charakter permitivity*

	homogénne	nehomogénne
izotropné	$\vec{\epsilon}(\vec{r}) = \epsilon$	$\vec{\epsilon}(\vec{r}) = \epsilon(\vec{r})$
anizotropné	$\vec{\epsilon}(\vec{r}) = \vec{\epsilon}$	$\vec{\epsilon}(\vec{r}) = \vec{\epsilon}(\vec{r})$

Pokiaľ by sme sa zaoberali iba izotropnými prostrediami, môžeme aplikovať operátor na rovnicu (1.17) a môžeme zmeniť poradie derivácií podľa času a súradnice, dostaneme po dosadení do vzorca (1.18) vzťah:

$$\nabla \times \nabla \times \vec{E} + \mu \frac{\partial \vec{j}}{\partial t} + \mu \frac{\partial^2 \vec{D}}{\partial t^2} = 0 \quad (1.26)$$

Môžeme použiť vektorovú identitu

$$\nabla \times \nabla \times \vec{E} = \nabla(\nabla \cdot \vec{E}) - \nabla^2 \vec{E} \quad (1.27)$$

Zvyčajne sa predpokladá, že

$$\nabla \cdot \vec{E} = 0 \quad (1.28)$$

Toto je splnené napríklad pre homogénne izotropné prostredia bez voľného náboja, ako plyní priamo z rovnice (1.19), alebo v dobrých vodičoch, kde je amplitúda akéhokoľvek náboja v objeme rýchlo tlmená. Ak platí vzťah (1.28) a vyššie uvedené materiálové vzťahy, dostaneme vlnovú rovnicu v tvare

$$\Delta \vec{E} - \mu \sigma \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} - \mu \epsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} - \mu \frac{\partial^2 \vec{P}}{\partial t^2} = 0 \quad (1.29)$$

Z vlnovej rovnice môžeme získať známe tvary vlnovej rovnice. Napríklad pre šírenia svetla vo vákuu je $\vec{P}=0$ a $\sigma=0$. Pre homogénne izotropné dielektrikum, pre ktoré platí (1.24) poznáme tvar

$$\Delta \vec{E} - \mu \sigma \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = 0 \quad (1.30)$$

teda fázová rýchlosť šírenia je

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon}} \quad (1.31)$$

V optike sa zavádza veličina index lomu prostredia, ako pomer rýchlosti vo vákuu k rýchlosti svetla v danom nemagnetickom prostredí [1].

$$n = \frac{c_0}{c} = \sqrt{\epsilon_r} \quad (1.32)$$

1.4 Polarizácia svetla

Z Maxvellových rovníc vyplýva, že rovinná svetelná vlna je priečna. Znamená to, že vektor elektrickej intenzity leží v rovine kolmej k smeru šírenia. Polarizácia svetla je daná smerom vektoru elektrického poľa v tejto rovine [1]. V našom prípade budeme uvažovať prípad rovinnej monochromatickej vlny. Pre oboznámenie s jednotlivými polarizáciami svetla, predpokladáme, že vlnenia ϵ_1 a ϵ_2 majú rovnakú frekvenciu, ten istý smer šírenia a aj ich vektory elektrického poľa kmitajú v navzájom kolmých rovinách. Ak by sme si zvolili pravouhlú súradnicovú sústavu O_{yz} tak, že by svetelné vektory kmitali v rovinách O_{xz} a vlnenia by sa šírili v smere osi z , potom ich môžeme pomocou zložiek vyjadriť v tvare:

$$\epsilon_{1x}(z, t) = E_{10} \cos(\omega t - kz) \quad (1.33)$$

$$\epsilon_{2y}(z, t) = E_{20} \cos(\omega t - kz) \quad (1.34)$$

pričom $\epsilon_{1y} = \epsilon_{1z} = 0$ a zároveň $\epsilon_{2x} = \epsilon_{2z} = 0$, E_{10} a E_{20} sú konštantné amplitúdy a Q je fázový rozdiel. Na základe princípu superpozície je výsledná intenzita elektrického poľa ϵ určená vzťahom.

$$\epsilon = \epsilon_1(z, t) + \epsilon_2(z, t) \quad (1.35)$$

zo vzorca môžeme vidieť, že zmenou času sa mení aj výsledné pole ϵ pri konštantnej hodnote z . Dôležitou otázkou je, akú krivku opisuje koniec vektora E intenzity elektrického poľa ϵ v rovine O_{xy} . Pokiaľ vylúčime z rovníc zo vzťahov 1.33 a 1.34 čas t , nájdeme rovnicu tejto krivky. Keďže

$$\frac{\epsilon_{2y}}{E_{20}} = \cos(\omega t - kz) \cos\varphi - \sin(\omega t - kz) \sin\varphi \quad (1.36)$$

po vyjadrení ϵ_{1x}/E_{10} a odčítaní oboch rovníc dostaneme

$$\frac{\epsilon_{2y}}{E_{20}} - \frac{\epsilon_{1x}}{E_{10}} \cos\varphi = -\sin(\omega t - kz) \sin\varphi \quad (1.37)$$

Na základe vzťahov 1.33 a 1.34

$$\sin(\omega t - kz) = \left[1 - \left(\frac{\epsilon_{1x}}{E_{10}} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1.38)$$

takže po dosadení do vzťahu a umocnení dostaneme hľadanú rovnicu [2].

$$\left(\frac{\epsilon_{1x}}{E_{10}} \right) + \left(\frac{\epsilon_{2y}}{E_{20}} \right) - 2 \left(\frac{\epsilon_{1x}}{E_{10}} \right) \left(\frac{\epsilon_{2y}}{E_{20}} \right) \cos\varphi = \sin^2\varphi \quad (1.39)$$

1.5 Interferencia

Z princípu superpozície vyplýva, že pokiaľ jednotlivé svetelné polia sú riešením vlnovej rovnice, je riešením aj ich súčet. Pokiaľ sa teda v priestore stretávajú napríklad dve svetelné vlny $E_1(r, t)$, $E_2(r, t)$, je výsledné pole dané súčtom:

$$E(r, t) = E_1(r, t) + E_2(r, t) \quad (1.40)$$

Okom a detektorom však dokážeme zaznamenávať intenzitu svetla, avšak to teda znamená, že ak odpovedajú zmienenými dvom svetelným poliam intenzity I_1 a I_2 , nie je obecné výsledná intenzita I rovná súčtu jednotlivých intenzít $I \neq I_1 + I_2$. Naopak sa ukazuje, že na určitých miestach môže byť intenzita väčšia ako súčet, v inom mieste zase menšia alebo dokonca nulová. Javy, v ktorých skladanie dvoch alebo viacerých polí vedie k priestorovej modulácii intenzity výsledného poľa sa nazývajú interferenčné javy. Môžeme teda považovať interferenciu svetla ako skladanie svetla. Pretože výsledná modulácia svetelnej intenzity je priamym dôsledkom vlnovej povahy svetla, považovala sa v histórii vždy existencia interferencie za priamy dôkaz vlnovej povahy svetla.

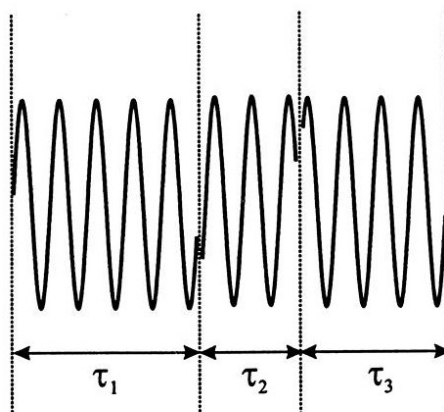
Akokoľvek nie je z teoretického hľadiska interferencia nič iné ako správne sčítanie vektorov elektrickej intenzity a potom výpočet intenzity svetla, z hľadiska optických javov zahrňujú interferenčné javy širokú škálu situácií – od interferometrov pre spektrálne merania cez laserové rezonátory až po farebné javy na olejových škvrnách na vode.

Aby sme našli podmienky, pri ktorých môžeme interferenciu pozorovať, musíme sa zaoberať charakterom svetelného vlnenia. Elementárnym zdrojom svetelného žiarenia je atóm. Aj keď vyžarované vlnenia vyjadruje vzťah $u(r, t) = A(r, t) \exp(i2\pi vt)$, musíme si uvedomiť, že doba trvania týchto vlnení je vzhľadom na dobu potrebnú na pozorovanie veľmi malá. Atómy vyžarujú za sebou veľké množstvo krátkych vlnových impulzov, ktoré majú rozličné parametre a ich počiatkové fázy sa neustále chaoticky menia. Každé vlnenie poznáme ako nekonečnú zmes „sínusoviek“ s rôznymi frekvenciami vysielanými rôznymi atómami. Vďaka vzťahu Fourierového integrálu dokážeme výsledné pole zapísať v tvare [1]:

$$u(t_0) = u_1(t_0 - t_1) + u_2(t_0 - t_2) + \dots \quad (1.41)$$

1.6 Koherencia

Koherencia svetla popisuje štatistické vlastnosti svetla. Z experimentálneho hľadiska sa dá približne povedať, že svetlo je koherentné, pokiaľ „dobře interferuje“. Jednoduchú predstavu môžeme získať, keď si predstavíme, že zdroj svetla vyžaruje dobre definovanú sínusovú vlnu po určitú dobu τ_j , potom dôjde ku skoku fázy o náhodnú hodnotu a opäť bude vyžarovaná sínusová vlna po dobu τ_{j+1} . Stredná doba medzi fázovými skokmi je τ_0 .



Obrázok 1.9: Svetlo zložené zo sínusových vln časových dĺžok τ_j [1]

Podľa Fourierovej transformácie takejto vlny odpovedá spektrálna šírka

$$\Delta\nu \approx \frac{1}{\tau_0} \quad (1.42)$$

Celková dĺžka vyžarovanej vlny je približne rovná

$$l_c = c\tau_0 \approx \frac{c}{\Delta\nu} \quad (1.43)$$

Ak uvažujeme vzťah medzi frekvenciou a vlnovou dĺžkou, môžeme vyjadriť ako

$$l_c \approx \frac{\lambda^2}{\Delta\lambda} \quad (1.44)$$

kde λ je v tomto prípade stredná vlnová dĺžka svetla. Pre biele svetlo je $\lambda = 300 \text{ nm}$, $\lambda = 500 \text{ nm}$, odpovedajúca hodnota $l_c \approx 800 \text{ nm} \approx 2 \lambda$. Čiara ortuťovej výbojky má vlnovú dĺžku 546 nm , jej šírka je $0,025 \text{ nm}$ a výsledok je $l_c = 1 \text{ cm}$. Pre lasery môže byť dĺžka l_c rovná 105 km . Predstavme si, že rozdelíme uvažovanú vlnu na dva zväzky, ktoré potom s istým vzájomným oneskorením skladáme. Pri popise interferencie rozhodovalo o výslednom poli relatívne dráhové oneskorenie dvoch zväzkov. V prípade uvažovaných zväzkov je situácia zložitejšia, pretože pokiaľ bude dráhový rozdiel väčší ako dĺžka l_c , nebude svetlo interferovať, ale bude sa skladať s náhodnými fázovými rozdielmi [1].

1.7 Zákony geometrickej optiky

1.7.1 Index lomu

Známa hodnota pre rýchlosť svetla, ktorá sa rovná približne $3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$. Táto rýchlosť svetla je uvažovaná pri šírení svetla vo vákuu. Vo všetkých ostatných prostrediach a látkach je rýchlosť menšia. Vo vákuu je rýchlosť rovnaká pre všetky vlnové dĺžky, ale v látkach je funkciou vlnovej dĺžky, tento jav sa nazýva disperzia. Index lomu pre svetlo o určitej vlnovej dĺžke teda určíme ako pomer rýchlosti svetla c vo vákuu k rýchlosti svetla v určitej vlnovej dĺžky v akejkoľvek látke. Všeobecne index lomu značíme písmeno n a pokiaľ je potrebné, uvádzame príslušnú vlnovú dĺžku ku ktorej sa vzťahuje, teda n_λ . Pokiaľ nie je uvedená vlnová dĺžka, predpokladáme obyčajne, že index lomu odpovedá žltému svetlu o vlnovej dĺžky 5893 Å (Abbeovo číslo). Index lomu je číslo bez rozmeru a je v prevažnej väčšine prípadov väčšia ako 1. Podľa definície platí:

$$n = \frac{c}{v} \quad (1.42)$$

Index lomu s klesajúcou vlnovou dĺžkou narastá a v prevažnej väčšine optických prostredí platí Cornuov vzorec, ktorý udáva závislosť indexu lomu na vlnovej dĺžke v tvare

$$n_{\lambda} = n_0 + \frac{a}{\lambda - \lambda_0} \quad (1.43)$$

kde n_0 , a , λ_0 sú konštanty.

Je dôležité poznamenať, že jedným zo základných vzťahov, ktoré sa týkajú akéhokoľvek druhu vlnového pohybu je, že sa rýchlosť šírenia v_{λ} rovná súčinu vlnovej dĺžky λ a frekvencie ν .

$$v_{\lambda} = \nu * \lambda \quad (1.44)$$

Z toho vyplýva, že keď svetlo prechádza z vákua do priehľadného prostredia, mení sa aj vlnová dĺžka, keďže sa počet vln opúšťajúcich rozhranie v akomkoľvek okamihu má rovnáť počtu prichádzajúcich vln. Ak je λ_0 vlnová dĺžka svetla vo vákuu, platí

$$\nu = \frac{v_{\lambda}}{\lambda} = \frac{c}{\lambda_0} \quad (1.45)$$

z toho [8].

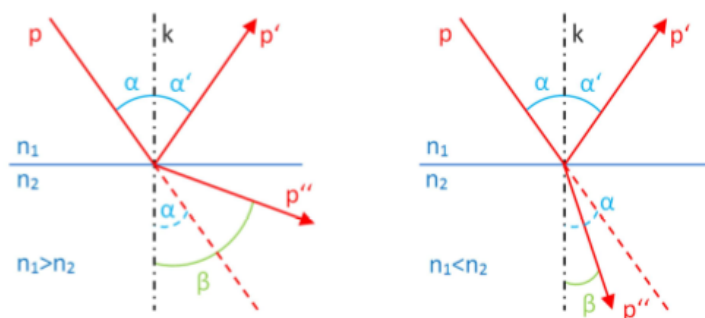
$$\lambda = \frac{\lambda_0}{n} \quad (1.46)$$

1.7.2 Zákon odrazu a lomu svetla

Pokiaľ sa z geometrického pohľadu pozrieme na svetlo ako na svetelné lúče, pri ich šírení dochádza k interakciám s prostredím, ktoré sa prejavuje rôznymi optickými javmi. Niektoré z nich je možné s určitou presnosťou opísať aj bez toho, aby sa vychádzalo z elektromagnetickej alebo fotónovej teórie svetla. Umožňujú to rôzne princípy, ktoré v histórii popísali rôzni fyzici či optici.

Pokiaľ dopadne lúč jednofarebného svetla v prostredí o určitom indexe lomu n na rozhranie, ktoré ho oddeľuje od iného prostredia o rozdielnom indexe lomu n' , delia sa všeobecne na dva lúče, ktoré postupujú od miesta dopadu zmenenými smermi. Jeden postupuje do prostredia druhého a nazýva sa lomený lúč, druhý zostáva po interakcii v prvom prostredí a nazýva sa odrazený lúč. Toto nastane za predpokladu pokiaľ je rozhranie v optickom zmysle hladké, čiže nerovnosti sú rádovo menšie ako $1/8 \lambda$ dopadajúceho svetla. Pokiaľ prechádza lúč z opticky redšieho do opticky hustejšieho prostredia, nastáva lom ku kolmici k . V opačnom prípade, pri prechode z opticky hustejšieho do opticky redšieho prostredia nastáva lom od kolmice. Tieto javy popisuje zákon lomu, taktiež známy pod názvom Snellov zákon, pomenovaný podľa holandského matematika W. Snelliusa. Tento jav je možné najjednoduchšie vyjadriť pomocou rovnice:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{n_2}{n_1} \quad (1.47)$$



Obrázok 1.10: Možné situácie pri interakcii svetla pri dvoch rôznych prostrediach

Odraz a zároveň lom svetla však nemusia nastať súčasne. Pokiaľ nastanú určité podmienky, dochádza k totálnemu odrazu na rozhraní dvoch optických prostredí. Prvá podmienka, ktorá musí nastať, je prechod svetla z opticky hustejšieho prostredia do opticky redšieho prostredia. Druhou podmienkou je dopad svetla pod väčším uhlom, ako je tzv. medzný uhol dopadu. Medzný uhol je možné určiť, pokiaľ uhol lomu je rovný 90° , toto je možné vyvodiť aj dosadením do Snellovho zákona [3].

1.7.3 Odraz svetla na kovoch

Kovy vykazujú obecnú veľkú odrazivosť. Príčinou je to, že dopadajúcim svetlom sa uvedú voľné elektróny do vynútených kmitov. Nimi vytvorené vlny sa skladajú s dopadajúcimi, takže prechádzajúca vlna sa zruší a takmer všetko svetlo sa odráža. Časť svetelnej energie dopadajúcej vlny sa mení v kove na teplo. Táto časť je tým väčšia, čím má kov menšiu elektrickú vodivosť, odrazená časť svetla je teda tým väčšia, čím lepšie vedie kov elektrický prúd.

Každý kov je charakterizovaný dvoma konštantami, indexom lomu a indexom absorpcie k . Odrazivosť R kovu je závislá na uvedených konštantách, na uhle dopadu a na polarizačnom stave dopadajúceho svetla. Závislosť uhlu dopadu nie je taká výrazná ako v prípade dielektrika, ako je ukázané na obrázku 45. v prípade striebra a ocele pre svetlo o vlnovej dĺžke $\lambda = 589,3$ nm. Odrazivosť na kovoch v kolmom dopade je daná vzorcom.

$$R = \frac{(n-1)^2 + k^2}{(n+1)^2 + k^2} \quad (1.48)$$

Je zrejmé, že pre $k = 0$ dostávame vzorec platný pre odrazivosť na dielektriku (napr. skle). Optické konštanty niektorých kovov pre vlnovú dĺžku $\lambda = 589,3$ nm udáva tabuľka 2. Optické konštanty kovov sú závislé nie len na druhu kovu, ale taktiež na vlnovej dĺžke dopadajúceho svetla.

Tabuľka 1.2: Optické konštanty niektorých druhov materiálov pre vlnovú dĺžku 589 nm. V prípade hliníka konštanty odpovedajú vlnovej dĺžke 546,1 nm [8]

Materiál	Index lomu (n) [-]	Index absorpcie (k) [-]	Odrazivosť (R) [%]
Striebro	0,177	3,638	0,950
Oceľ	2,485	3,433	0,584
Meď	0,617	2,630	0,741
Zlato	0,370	2,820	0,851
Kobalt	2,120	4,040	0,675
Hliník	1,150	3,500	0,778

2 Tenké vrstvy

2.1 História tenkých vrstiev

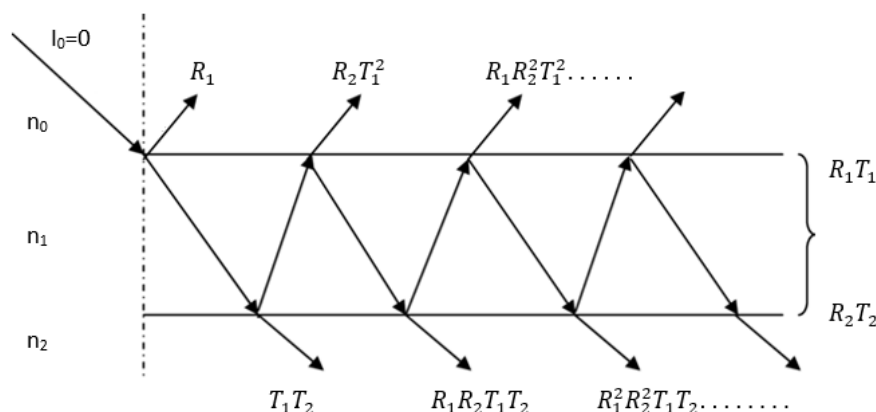
História tenkých vrstiev je vo všeobecnosti veľmi komplikovaná a máme veľmi nedokonalý pohľad na túto oblasť. Tenké kovové vrstvy boli známe už veľmi dávno, ale ako prvým znakom modernej tenko vrstvovej optiky môžeme považovať prácu Roberta Boyleho a Roberta Hookeho na farebných vzorkách materiálmi vo forme tenkej vrstvy. Krátko po tom dokázal Issac Newton zmerať približnú hrúbku tenkej vrstvy, technika známa ako Newtonové krúžky. Vyše 200 rokov žiadny významný posun v oblasti optiky tenkých vrstiev nenastal. V roku 1817 významný fyzik Josep von Fraunhofer pravdepodobne ako prvý popísal niečo ako antireflexný náter. V jeho postrehoch poukazuje na rôzne fyzikálne príčiny, ktoré si vtedajší fyzici nedokázali vysvetliť. V roku 1873 bolo publikované veľké dielo Jamesa Clerka Maxwella o elektrine a magnetizme, vďaka čomu sa pohľad na optiku nesmierne zmenil a rovnako tak aj na pochopenie fungovania tenkých vrstiev. V roku 1886 sa Lord Rayleigh snažil experimentálne overiť Fresnelové odrazové zákony. Pri meraniach zistil, že je potrebné použiť čerstvo leštené sklo, pretože odrazivosť staršieho skla, aj keď bez viditeľných známok poškodenia bola príliš nízka. Jeho vysvetlením bolo vytvorenie tenkej vrstvy s iným indexom lomu na povrchu podkladového materiálu. Po roku 1891 Dennis Taylor, ktorý sa venoval teleskopickým objektívom, pokračoval vo vývoji spôsobu nanášania vrstvy chemickým leptaním. Na túto prácu nadviazal Kollmorgen, ktorý rozvíjal chemický proces pre rôzne typy okuliarov. Zároveň v 19. storočí sa dosiahol veľký pokrok v oblasti interferometrie. Najvýznamnejším vývojom z hľadiska tenkých vrstiev bol Fabry-Perotov interferometer opísaný v roku 1899. Vývoj začal rýchlo napredovať v 30-tych rokoch 20. storočia a v tomto období George Rouard pozoroval, že pri veľmi tenkej kovovej vrstve znížil vnútornú odrazivosť sklenenej platne, aj napriek tomu že vonkajšia odrazivosť bola zvýšená [9].

2.2 Princíp fungovania tenkých vrstiev

Ako bolo spomenuté, korene tejto optickej disciplíny siahajú do 30. rokov minulého storočia, kedy sa v súvislosti s nutnosťou konštrukcie kvalitných optických prvkov a prístrojov sústredila pozornosť na riešenie dvoch protikladných úloh. Jednou bolo zväčšiť odrazivosť povrchov optických plôch (napr. pri zhotovovaní zrkadiel) a druhou zmenšiť odraz povrchov (napr. objektívu ďalekohľadu). Takýchto úloh vznikalo neskôr čoraz viac, najmä v oblasti fyziky a techniky laserov, ale aj vo fyzike tuhých látok a v rade nefyzikálnych vedných odborov.

Metódy optiky tenkých vrstiev, ktoré tieto úlohy riešia, sú založené na využití Fresnelových vzťahov. Tieto metódy umožňujú vypočítať, aké vrstvy (s akou hrúbkou a akým indexom lomu) musíme pre daný účel použiť. Ukážeme, ako môže už jedna vrstva na optickej ploche ovplyvniť jej odrazivosť a spomenieme niektoré základné vlastnosti sústav viacerých tenkých vrstiev.

Pri našich úvahách sa ohraničíme na homogénne vrstvy, teda na také, ktorých index lomu je v celej vrstve rovnaký. Vzhľadom na to, že najčastejšie meníme odrazivosť na povrchu skla umiestnenom vo vzduchu, budeme uvažovať prostredia v tomto zložení a poradí: vzduch-vrstva-sklo.



Obrázok 2.1: Hrubá vrstva s indexom lomu n_1 je na skle s indexom lomu n , n_0 je index lomu vzduchu [2]

Uvažujeme takúto sústavu, pričom predpokladajme, že vrstva na skle je hrubá a dopadá na ňu biele svetlo kolmo (pri obrázku je pre názornosť uhol dopadu iný). Pretože na hrubej vrstve nenastáva interferencia svetla a neuvažujeme absorpciu, nemusíme brať do úvahy pri výpočte odrazivosti hrúbku vrstvy, dôležitý je len index lomu n_1 . Označme odrazivosť a priepustnosť na 1. rozhraní ako R_1 a T_1 , na druhom rozhraní ako R_2 a T_2 . Na základe Fresnelových vzťahov, bez ohľadu na stav polarizácie a pre $n_0 = 1$ platí:

$$R_1 = \left(\frac{n_1 - 1}{n_1 + 1} \right)^2 \quad (2.1)$$

$$R = \left(\frac{n - n_1}{n + n_1} \right)^2 \quad (2.2)$$

a podľa vzťahu

$$R_1 + T_1 = 1 \quad (2.3)$$

$$R_2 + T_2 = 1 \quad (2.4)$$

vypočítame teraz intenzitu odrazeného svetla tak, že sčítame intenzity všetkých vlnení, ktoré sa vracajú do vzduchu (svetelné vlny vytvorené hrubou vrstvou nie sú koherentné, preto nemá zmysel sčítavať amplitúdy). Ak predpokladáme, že intenzita dopadajúceho svetla $I_0 = I$, potom intenzita odrazeného svetla sa číselne rovná odrazivosti sústavy R a z obrázku 2.1 je zjavné že platí:

$$R = R_1 + R_2 R_1^2 + R_1 R_2^2 T_1^2 + R_1^2 R_2^3 T_1^2 + \dots = R_1 + R_2 T_1^2 (1 + R_1 R_2 + R_1^2 R_2^2 + \dots) \quad (2.5)$$

a keďže $T_1 = 1 - R_1$ a $R_1 R_2 < 1$, dostávame

$$R = \frac{R_1 + R_2 - 2R_1 R_2}{1 - R_1 R_2} \quad (2.6)$$

a obdobne pre priepustnosť sústavy T .

$$T = \frac{(1 - R_1)(1 - R_2)}{1 - R_1 R_2} \quad (2.7)$$

Ak dosadíme za R_1 a R_2 zo vzťahov (2.1 a 2.2), nájdeme závislosť $R(n_1)$.

$$R(n_1) = 1 - \frac{4nn_1}{(n_1^2 + n)(n + 1)} \quad (2.8)$$

Hľadáme teraz aký index lomu n_1 musí mať vrstva, aby bola odrazivosť našej sústavy minimálna. Zo vzťahu (2.8) nájdeme, že rovnici $dR/dn_1 = 0$ vyhovuje indexu lomu.

$$n_1 = \sqrt{n} \quad (2.9)$$

Lahko sa presvedčíme o tom, že druhá derivácia $R(n_1)$ je kladná, teda riešenie (2.9) odpovedá minimu funkcie $R(n_1)$. Po dosadení do vzorca (2.8) pre minimum dostaneme.

$$R_{min} = \frac{(\sqrt{n}-1)^2}{n+1} \quad (2.10)$$

Porovnajme túto hodnotu s odrazivosťou čistého skla R_0 , pre ktorú platí.

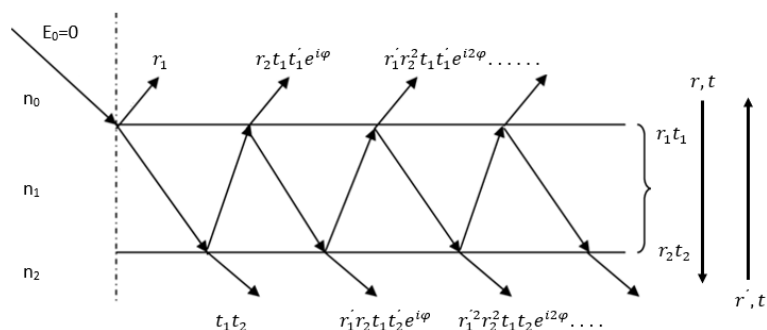
$$R_0 = \left(\frac{n-1}{n+1}\right)^2 \quad (2.11)$$

Vidíme, že,

$$\frac{R_0}{R_{min}} = 1 + \frac{2\sqrt{n}}{n+1} \approx 2 \quad (2.12)$$

teda v prípade skla ($n \approx 1.5$) je možné hrubou vrstvou znížiť odrazivosť skla na polovicu. Ťažkosť je v tom, že splneniu podmienky (2.9) bráni nedostatok vhodných materiálov.

Pozrime sa teraz, čo sa stane, ak hrubú vrstvu nahradíme tenkou. V tomto prípade budeme najprv predpokladať, že na tenkú vrstvu kolmo dopadá monochromatické svetlo s vlnovou dĺžkou λ_0 . Pretože odrazené vlnenia sú koherentné, pri výpočte odrazivosti berieme do úvahy interferenciu svetla a preto musíme sčítavať komplexné amplitúdy vlnení.



Obrázok 2.2: Tenká vrstva hrúbky d s indexom lomu n_1 na skle s indexom lomu n , n_0 je index lomu vzduchu [2]

Uvažujme opäť našu sústavu, pričom tenká planoparalelná vrstva má hrúbku d . Bude nás zaujímať amplitúda odrazeného svetla, pričom budeme predpokladať, že pre amplitúdu intenzity elektrického poľa dopadajúceho vlnenia platí $E_0 = 1$. Výpočet je podobný, ako pri viacnásobnej interferencii s tým rozdielom, že na oboch stranách vrstvy sú rôzne prostredia. Preto Fresnelové amplitúdy pre odraz a pre lom na prvom rozhraní (r_1, t_1) sú iné ako na druhom rozhraní (r_2, t_2). Pri dopade na rozhrania musíme pri výpočte amplitúd rozlišovať aj smery, z ktorých svetlo na rozhranie dopadá. Pri dopade svetla na rozhranie v smere zdola – nahor, vyjadríme to čiarkou (teda napr. r'). Pre dráhový rozdiel Δ platí síce vzťah, ktorý pre $\beta = 0$ dáva,

$$\Delta = 2n_1d \quad (2.13)$$

musíme ale brať do úvahy možnosť zmeny fázy pri odraze od opticky hustejšieho prostredia. Keďže $n_0 = 1$, stačí uvažovať dva prípady a to $n_1 < n$ a $n_1 > 1$ [2].

2.3 Technológie výroby tenkých vrstiev

Pravdepodobne ako prvý pokus o vytvorenie tenkej vrstvy siaha až do čias rímskej ríše, kedy sa na sklenený substrát zalievala tenká vrstva olova kvôli zvýšeniu odrazivosti. Ďalší posun nastal až v polovici 19. storočia chemickým striebrením zrkadiel. Do začiatku 20. storočia nebolo potrebné vytvárať tenké vrstvy so špecifickými vlastnosťami a s významnou presnosťou, tenké vrstvy v tej dobe sa využívali hlavane kvôli znižovaniu odrazivosti. Od polovice 20. storočia sa však optickým systémom a svetlu začala venovať vyššia pozornosť a tým pádom sa zvýšil aj záujem o rôzne typy tenkých vrstiev a najmä ich presnej charakteristike. V dnešnej dobe existuje mnoho technologických zariadení a postupov pri vytváraní tenkých vrstiev, hlavné rozdelenia budú opísané v nasledujúcich podkapitolách.

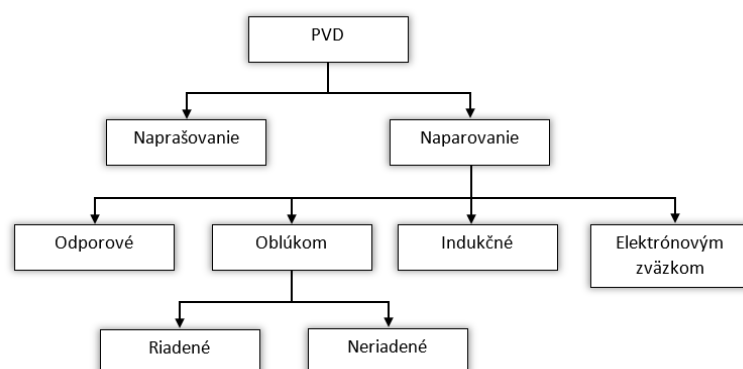
Hlavnou úlohou tenkých vrstiev je teda upravovať vlastnosti substrátu, aj keď vlastnosti tenkých vrstiev môžu byť z hľadiska životnosti substrátu, tepelnej, chemickej či dokonca akustickej odolnosti, hlavnými cieľmi bývajú najčastejšie optické vlastnosti substrátov. Aby vrstva dosiahla požadované optické vlastnosti, musí byť táto vrstva opticky hladká, čo znamená, že odchýlky od dokonalu hladkej tenkej vrstvy by sa mali pohybovať v rádovo nižších rozmeroch ako je vlnová dĺžka svetla [10].

2.3.1 Fyzikálna depozícia - PVD

Tento typ depozície z plynnej fázy zahŕňa široké spektrum technológií. Princíp spočíva na nanášaní tenkej vrstvy z pevného materiálu na povrch substrátu. Behom tohto procesu majú dominantný vplyv fyzikálne procesy oproti chemickým reakciám. Pevný materiál určený k nanášaniu je prevedený do plynného stavu a následne kondenzuje na substráte. Aby došlo k nanášaniu je potrebné vytvoriť vákuum o vysokej hodnote. Tlak vytvoreného vákua sa pohybuje od 100 do 10^{-8} Pa v závislosti na zvolenej technológii. Teplota substrátu pri nanášaní sa pohybuje v rozmedzí od 150 °C do 500 °C. Vďaka tomu je možné pomocou PVD metódy nanášať tenké vrstvy na substráty z rôznych materiálov ako napríklad oceľ, hliník, plasty. Z ekologického hľadiska je táto metóda najšetrnejšia, pretože nepracuje so žiadnym nebezpečným materiálom, ani sa behom depozície neuvolňujú žiadne toxické látky [11]. Medzi základne rozdelenie PVD technológie je rozdelená do dvoch častí a to buď naparovaním alebo naprašovaním.

2.3.1.1 Naparovanie

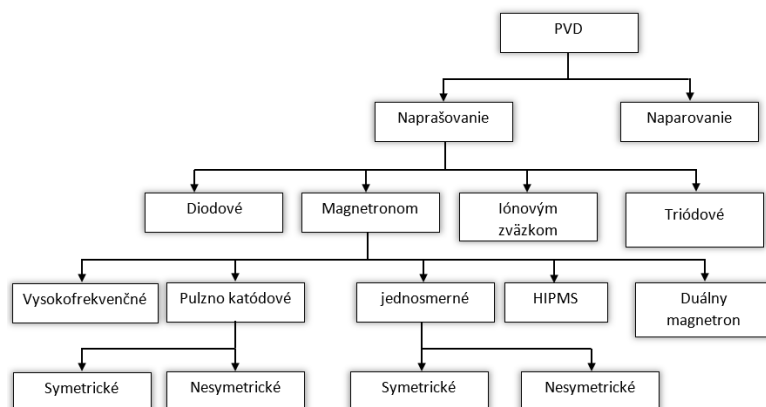
Klasické naparovanie je metóda, pri ktorej sa nanášaný materiál uvedie do plynného stavu vo vákuu dodaním tepla. Tento odparovaný materiál je umiestnený priamo pod substrátom. Priamočiarym pohybom sa molekuly plynu dostanú na povrch substrátu, na ktorom kondenzujú, čím vytvoria tenkú vrstvu. Premenu materiálu do plynného stavu je možné doceliť odporovým alebo indukčným ohrevom, oblúkovým výbojom, elektrónovým delom alebo laserovým zväzkom. Naparovaním je možné upravovať výrobky z kovu, niektoré dielektriká a polovodiče [12].



Obrázok 2.3: *Prehľad technológií PVD naparovania [12]*

2.3.1.1 Naprašovanie

Metóda naprašovania sa využíva hlavne pre nanášanie tenkých vrstiev z materiálov pri vysokej teplote topenia. Naprašovacia aparátúra sa skladá z katódy, ktorú tvorí materiál určený k nanášaniu, odprašovacieho pracovného plynu, vakuovej komory, substrátu a zdroja energie. Aj v tomto prípade existuje niekoľko spôsobov akým spôsobom a za akých podmienok sa dosahuje samozné naprašovanie, prípadne či sa využívajú ďalšie zariadenia pre skvalitnenie procesu, jako napríklad magnetické pole [12].



Obrázok 2.4: *Prehľad technológií PVD naprašovania [12]*

2.3.2 Chemická depozícia - CVD

Typ CVD procesu zahŕňa niekoľko metód založených na chemických procesoch plynov, pomocou ktorých sú pri vysokých teplotách (950 °C až 1050 °C) vytvárané tenké vrstvy na substráte. Použitý plyn, obsahujúci zlúčeniny, ktoré sa ďalej rozkladajú pri nanášanom procese musia byť stabilné. V tesnom okolí substrátu sú činidlá, ktoré sa po prijatí dostatočnej energie aktivujú a dochádza k heterogénnym chemickým reakciám v prítomnom plazmate. Výsledný produkt je ukladany na substráte. Energiu činidlom môžeme dodať ohrevom, plazmovým oblukovým výbojom alebo laserom [12].

2.4 Typy tenkých vrstiev

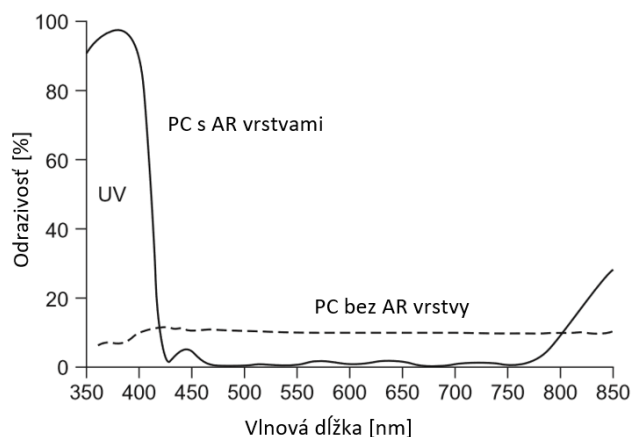
2.4.1 Protiodrazové tenké vrstvy

Vrstvy, ktoré plnia účel znižovania odrazivosti, prípadne až úplného eliminovania odrazivosti majú najdlhšiu históriu v praktických aplikáciách. Zo všetkých typov tenkých vrstiev má práve tento typ najväčší vplyv na technickú optiku a v dnešnej dobe vysoko prevyšujú ostatné typy tenkých vrstiev. Antireflexné vrstvy sa môžu pohybovať od jednoduchej tenkej vrstvy, ktorá má nulovú odrazivosť pre určitú vlnovú dĺžku, prípadne použitie viacvrstvového systému ktorý dosahuje nulovú odrazivosť pre určitý rozsah vlnových dĺžok. Typ použitia tenkých vrstiev pre konkrétne aplikácie závisí od množstva faktorov, medzi hlavné patrí materiál substrátu, požadovaný výkon, náklad na výrobný proces, prípadne oblasti vlnových dĺžok u ktorých je žiadúce zabrániť odrazivosti. Ako bolo spomenuté, u protiodrazových tenkých vrstiev je dôležitý materiál substrátu a najmä index lomu tohto substrátu. V takomto prípade je vhodné rozdeliť tenké vrstvy uložené na substráty s vysokým indexom lomu a substráty s nízkym indexom lomu.

Pod pojmom vysoký index lomu nie je možné presne definovať rozsah, obzvlášť minimálnu hodnotu. V jednoduchosti to znamená, že index lomu substrátu je podstatne vyšší ako index lomu tenkej vrstvy a to z dôvodu vysoko účinných antireflexných vrstiev. Tieto substráty s vysokým indexom sa používajú predovšetkým v infračervenej oblasti.

Aj keď sa doterajšia teória vyvinutá pre antireflexné vrstvy na materiáloch s vysokým indexom lomu aplikuje rovnako dobre aj na materiály s nízkym indexom lomu, problém je v druhom prípade oveľa ťažší a to z dôvodu nedostatku robustných tenkovrstvových materiálov s veľmi nízkym indexom lomu. Fluorid horečnatý s indexom lomu približne 1,38 predstavuje najnižší index lomu, ktorý je možné dosiahnuť. Veľmi častým materiálom s nízkym indexom lomu je korunové sklo pri ktorom sa najčastejšie vyžadujú vrstvy na viditeľnú spektrálnu oblasť.

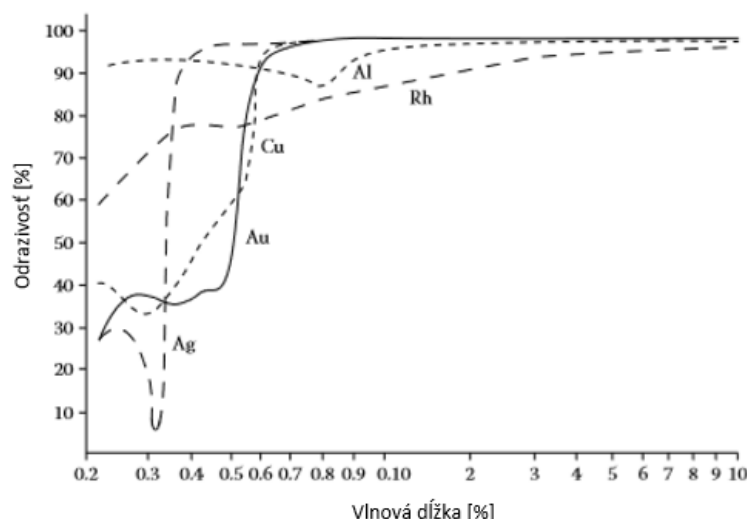
Typickým príkladom môže byť ochrana proti žiareniu v UV oblasti pri polykarbonátových substrátoch, aby sa zabránilo ablácii povlaku. Táto úloha je pomerne náročná, pretože absorpčné charakteristiky typických odparovacích materiálov nie sú dostatočné na zablokovanie absorpcie kritickej vlnovej dĺžky v rozmedzí 350 až 400 nm. Obrázok 2.6 ukazuje charakteristiku takejto tenkej vrstvy na polykarbonátovom substráte s vysokou odrazivosťou v danom rozsahu vlnových dĺžok [10].



Obrázok 2.5: Porovnanie odrazivosti polykarbonátového substrátu bez pokovenia a s antireflexným pokovením (AR) [10]

2.4.2 Odrážové tenké vrstvy

Ako bolo spomenuté, úlohou odrážových tenkých vrstiev je odrážať čo najväčšie množstvo dopadajúceho svetla. V prevažnej väčšine prípadov je jedinou úlohou práve čo najvyššia odrazivosť, avšak existujú aj špeciálne aplikácie, pri ktorých okrem vysokej odrazivosti by mala byť aj absorpcia čo najnižšia. Pri zrkadlách v optických systémoch zvyčajne kovové vrstvy poskytujú dostačujúci výkon, ale pri niektorých aplikáciách, kde je vyžadujúca ešte vyššia odrazivosť, je možné dosiahnuť pridaním dielektrických vrstiev.



Obrázok 2.6: Odráživosť čerstvo nanesených vrstiev hliníka, medi, zlata, ródia a striebra v rozsahu vlnových dĺžok od 0,2 μm až 10 μm [9]

Na obrázku 2.6 je znázornená odrazivosť najbežnejších kovov. Striebro bolo kedysi najpopulárnejším materiálom. Až do polovice 30. rokov minulého storočia bol tento materiál používaný ako hlavný odrážový materiál pre presnú optiku. Zlato je považované za najlepší materiál pre infračervené odrážajúce vrstvy. Jeho odrazivosť rýchlo klesá vo viditeľnej oblasti, najmä v okolí 300-350 nm. Na skle má zlato tendenciu vytvárať mäkké, mierne poškodené vrstvy, ale silne priľne k vrstvám chrómu alebo nichrómu. Zubné zrkadlá, ktoré sú podrobené pomerne ťažkému prostrediu sú zvyčajne nanesené tenkou vrstvou ródia. Ródium sa používa aj pri niektorých automobilových spätných zrkadlách, ktoré sú vystavené ťažkým poveternostným podmienkam a znečisteniu. Chróm je o niečo lacnejší ako ródium a je tiež používaný pre automobilové zrkadlá.

Väčšina kovových tenkých vrstiev je pomerne mäkkšia v porovnaní s dielektrickými vrstvami a dajú sa ľahko poškriabať. Toto je v prípade kovových vrstiev veľká nevýhoda, najmä ak je potrebné pravidelné čistenie. Jedným z riešení je periodické obnovovanie vrstvy, čo je ale náročný proces. Alternatívou, ktorá by zabezpečila odolnosť takýchto vrstiev a zároveň poskytne ochranu pred atmosférickou koróziou je prekrytie ďalšou dielektrickou vrstvou [9].

2.4.3 Interferenčné tenké vrstvy

Vo vede a v technike je často nutné izolovať zo spektra úzku časť vlnových dĺžok. Hranolové a mriežkové monochromátory túto požiadavku síce splňujú, avšak sú príliš drahé a poskytujú malú intenzitu svetla. Absorpčné filtre sú pomerne lacné a zároveň obory priepustnosti majú veľmi široké. Existujú celkom tri druhy takýchto filtrov: na svetlo prepustené, na svetlo odrazené a na svetlo úplne odrazené.

2.5 Tenké kovové vrstvy na polykarbonátovom substráte

2.5.1 Polykarbonát (PC)

Polykarbonát patrí do skupiny termoplastov ako polyester. Ide o látku bez pravidelnej kryštalickej štruktúry. Vďaka jeho kvalitným vlastnostiam ako je najmä húževnatosť, vysoký rozsah pracovných teplôt bez zmeny pevnosti, sa radí medzi veľmi používané materiály [13,14].

Materiál vyniká predovšetkým schopnosťou udržania si vlastností, ktoré sú konštantné v rozmedzí teplôt od -70°C až do 140°C . V tomto teplotnom rozmedzí sa materiál nerozťahuje a drží si chemickú odolnosť. Polykarbonát sa vyznačuje vysokou transparentnosťou, ktorá sa pri viditeľnom spektre pohybuje v rozpätí 80 – 90 % a index lomu sa pohybuje v okolí 1,584 [15,16].

2.5.2 Chróm

Chemický prvok chróm (zn. Cr) je lesklý, biely, krehký a veľmi tvrdý kov – najtvrdší zo všetkých elementárnych kovov (podľa Mohsovej stupnice). Je chemicky veľmi odolný a stály, pri normálnych teplotách nereaguje so žiadnymi prvkami, pri vyšších teplotách reaguje s halogénmi ako sú siera, uhlík, bór alebo kremík, prípadne s niektorými kovmi pri teplotách až 1000°C . Medzi ďalšie prednosti patrí odolnosť voči korózii, uchováva si svoj lesk, odpudzuje vodu, mastnoty a nečistoty [17,18,19].

2.5.3 Hliník

Tento druh kovového materiálu patrí k najrozšírenejším na zemi. Je pomerne ľahký, má dobrú odolnosť a vysokú odrazivosť. Napriek pomerne jednoduchej spracovateľnosti má dobrú pevnosť, oproti iným kovom je však náchylnejší na deformácie. Odrazivosť svetla od tohto materiálu je vyššia ako 85 % a môže dosahovať maximálnu odrazivosť až 96 %, v závislosti od typu výroby a čistoty [20,21].

2.6 Aplikácie tenkých vrstiev v automobilovom priemysle

Opticky tenké, prípadne hrubé vrstvy na v automobilovom priemysle používajú vo viacerých oblastiach, či už ide o ochranné vrstvy, protiodrazové vrstvy, odrazové vrstvy alebo interferenčné vrstvy. Takéto vrstvy sú väčšinou aplikované na sklách alebo svetelných funkciách jednotlivých automobilov.

2.6.1 Ochranné vrstvy

Polykarbonát v automobilovom priemysle ponúka veľmi atraktívne možnosti a využitie, najmä kvôli zníženej hmotnosti v porovnaní s klasickým sklom, to má za následok zníženie spotreby vozidla. Výmena skla za polykarbonát dochádza napríklad u panoramatickej strechy auta alebo osvetľovacích systémov. Tieto aplikácie však musia splniť vysokú environmentálnu stabilitu, pretože nanosené vrstvy sú vystavené poveternostným vplyvom, UV žiareniu a mechanickému opotrebeniu (obrázok 2.7). Tieto ochranné vrstvy sú používané na všetkých sklách vozidla ale aj spätných zrkadlách [10].



Obrázok 2.7: Dve sklenené tabule umiestnené vedľa seba za rovnakých podmienok, naľavo: sklo bez ochrannej vrstvy; vpravo ochranná vrstva [10]

2.6.2 HUD displej

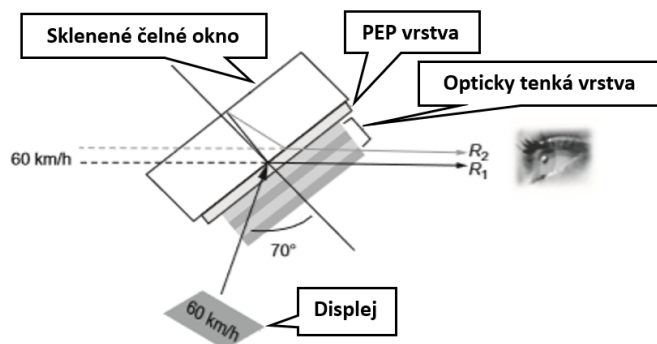
Head up Display je displej, ktorý umožňuje užívateľovi zobrazit' zobrazené údaje z polohy vodiča daného automobilu obsahujúceho túto technológiu. Táto technológia bola pôvodne vyvinutá vo vojenskom priemysle a obzvlášť v leteckom priemysle, v súčasnosti má zastúpenie aj v automobilovom priemysle. Zobrazené údaje môžu byť napríklad rýchlosť vozidla, navigačné informácie, výstražné signály a mnoho ďalších informácií, viď obrázok 2.8.



Obrázok 2.8.: Technológia HUD [10]

Premietaný obraz z HUD systému je neostrý kvôli dvojitému odrazu dvoch povrchov od hrubého čelného skla automobilu. Možný riešením pre automobilové HUD systémy je pripevnenie tmavej vrstvy na čelné sklo, aby sa znížila odrazivosť druhého obrazu. Napriek tejto výhode sa znižuje prehľadnosť reálneho vonkajšieho obrazu. Ďalším príkladom je použitie okuliarov alebo dvojítych

okuliarov na oddelenie druhého odrazového obrazu, ale takéto okuliare potrebujú špeciálny dizajn a výroba by bola príliš drahá. Ďalším spôsobom odstránenia problémov je použitie tzv. beam splitteru (viď obrázok 2.9), čiže rozdeľovaču lúčov pomocou optických tenkých vrstiev. Takýto prístup má mnoho výhod ako je viacfarebná odrazivosť, zníženie vplyvu dvojitého obrazu a zároveň dosiahnutie viac ako 70% priepustnosti [10].



Obrázok 2.9: Optický návrh beam splitteru pre HUD technológie [10]

3 Praktická časť

3.1 Popis používaných prístrojov a referenčných vzorkov

3.1.1 Halogénový zdroj

U všetkých meraní bol ako zdroj žiarenia použitý svetelný zdroj od spoločnosti Ocean Optics (obrázok 3.1). Ide o halogénový zdroj verzie LS-1-LL. Základné parametre tohto zdroja sú:

- Spektrálny rozsah: 360-2500 nm
- Farebná teplota: 2800 K
- Stabilizovanie zdroja: približne 30 minút

Tento zdroj vďaka širokému spektrálnemu rozsahu bol používaný na všetky typy meraní



Obrázok 3.1: Halogénový zdroj Ocean Optics LS-1-LL

3.1.2 Spektrometer Ocean Optics USB 4000

Nevyhnutnou časťou meraní bol spektrometer Ocean Optics USB 4000, vďaka ktorému bolo možné zmerať optické parametre jednotlivých vzoriek. Detekovateľný rozsah elektromagnetického žiarenia je v prípade tohto spektrometru v rozsahu od 200 nm do 1100 nm vďaka detektoru Toshiba TCD1304AP.

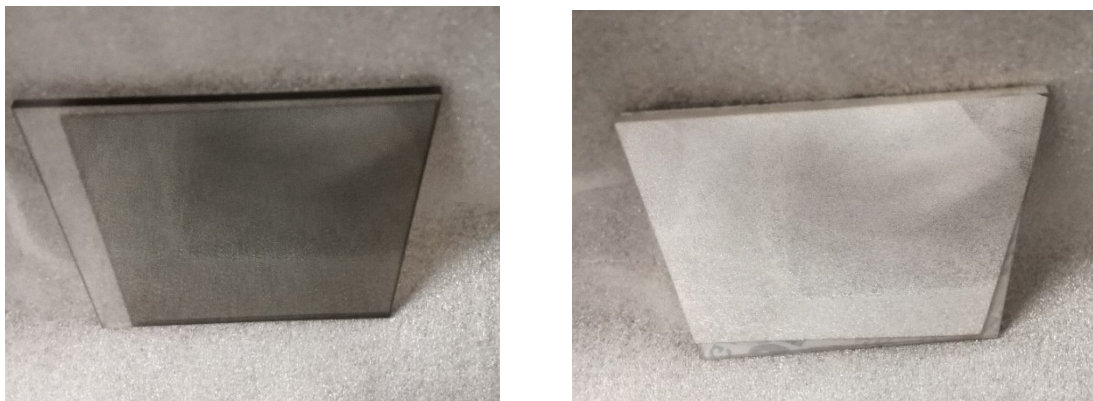


Obrázok 3.2: Spektrometer Ocean Optics USB 4000

3.2 Popis meraných tenkých vrstiev

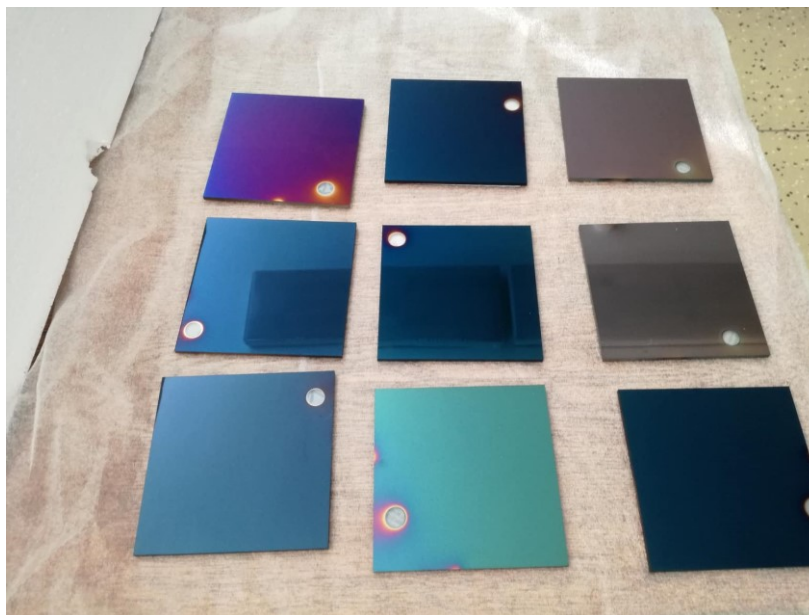
Všetky merané vzorky boli dodané spoločnosťou Varroc Lighting Systems s.r.o., ktorá primárne využíva technológiu tenkých, prípadne hrubých vrstiev najmä k zvýšeniu odrazivosti plôch v lampách pri jednotlivých svetelných funkciách. Preto práve najčastejším materiálom je hliník, ktorého odrazivosť, ako bolo spomenuté v teoretickej časti, sa pohybuje v okolí 90 %. Vzoriek pokovených

hliníkom bolo viac, avšak netransparentné vzorky hliníka mali rovnaké optické vlastnosti a preto v práci budem uvádzať dva typy hliníkových vzoriek a to transparentnú a netransparentnú (viď obrázok 3.3).



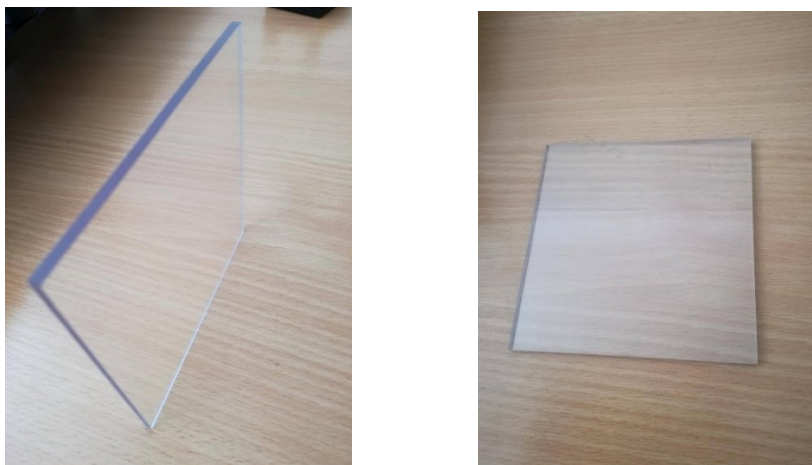
Obrázok 3.3: *Vľavo: Transparentná vzorka hliníka, vpravo: netransparentná vzorka hliníka*

Ďalším kovovým materiálom je chróm, vlastnosti sú popísané v teoretickej časti. Okrem týchto vlastností je chróm zaujímavý farebnosťou pri určitých parametroch výroby chrómovej vrstvy. Dodané vzorky pokovené tenkou vrstvou chrómu sú práve špecifické farebnosťou a niektoré vzorky sú zobrazené na obrázku 3.4.



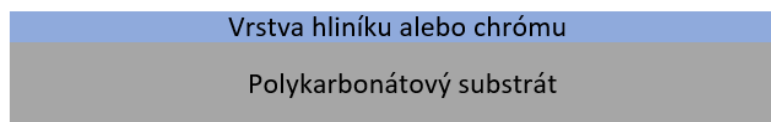
Obrázok 3.4: *Vzorky pokovené chrómom*

Čo sa týka množstva dodaných vzoriek chrómu, jedná sa o 25 vzoriek. Vzorky sa líšia teda rozličnými výrobnými parametrami a preto aj ich farebnosť je výrazne odlišná. Oba materiály, či už hliník alebo chróm boli nanesené na polykarbonátový substrát o rozmeroch 10 x 10 cm a hrúbka tohto substrátu bola 3 mm (obrázok 3.5).



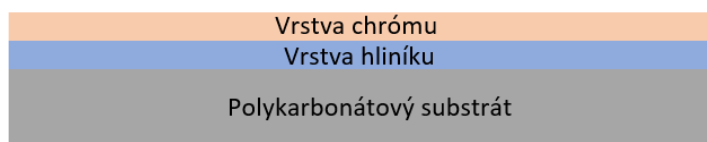
Obrázok 3.5: Čisté polykarbonátové vzorky

Hliníkové aj chrómové vrstvy boli nanesené technológiou naprašovania (sputtering). Hliník aj chróm sa naprašujú z targetu, ktorý je zložený s vodou chladenej základnej dosky, na ktorú sú pripevnené bloky hliníku prípadne chrómu. Celý target je uložený v silnom magnetickom poli tvorenom magnetmi. Magnetické pole usmerňuje tok molekúl týchto kovových materiálov. Na target je pripojený záporný pól zdroja jednosmerného napätia 500 V. Kladný pól je pripojený na tzv. zvon. Naprašované vzorky sú umiestnené oproti targetu. Pri vytváraní hliníkovej vrstvy je možné nastaviť niekoľko parametrov (výkon, čas procesu, otáčky, množstvo Argónu, atď.). Čo sa týka vytvárania chrómových vrstiev, nastavovať sa môžu rovnaké parametre ako je to u hliníku, ale je možné meniť aj množstvo dusíka a kyslíka. Zmenami týchto dvoch plynov je možné meniť farebnosť chrómovej vrstvy. Znázornené zloženie vzorku je ukázané na obrázku 3.6.



Obrázok 3.6: Typ zloženia jednej tenkej vrstvy

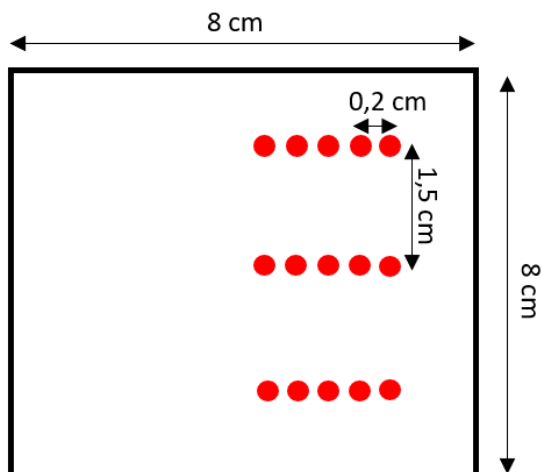
Bolo teda dodaných 35 vzoriek s vrstvami hliníku a chrómu, okrem nich boli merané aj vlastnosti čistého substrátu, teda polykarbonátu bez pokovenia a nakoniec multivrstvy polykarbonát-hliník-chróm ako je znázornené na obrázku 3.7.



Obrázok 3.7: Typ zloženia viacerých tenkých vrstiev na vzorke

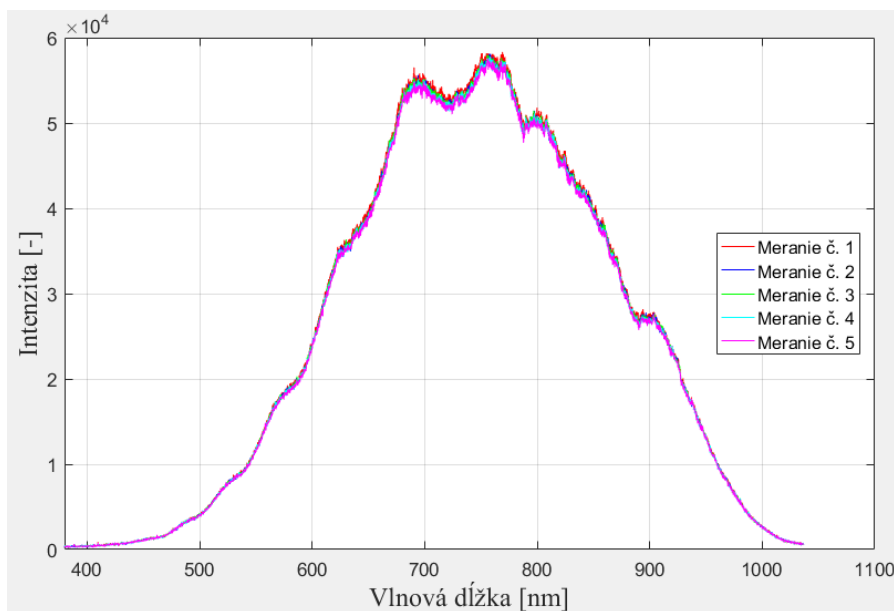
3.3 Overenie homogenity vzoriek optickými spôsobmi

Pred samotnými meraniami optických vlastností jednotlivých vzoriek dodaných spoločnosťou Varroc Lighting Systems s.r.o. bolo potrebné vedieť, či si vzorky zachovávajú rovnaké optické vlastnosti po celej ploche vzorky. Zvolil som si preto 15 bodov na ploche (obrázok 3.8) a meral som priepustnosť v jednotlivých bodoch vzorky a pozoroval zmenu spektra.



Obrázok 3.8: Zvolené jednotlivé body merania na ploche vzorky

Na obrázku (3.9) je zobrazený graf jednej vzorky a merania v jednotlivých bodoch. Tento typ preverenia homogenity a konštantnosti optických vlastností vzoriek bol prevedený na prvých deviatich dodaných vzorkách.



Obrázok 3.9: Graf zobrazujúci prepustené spektrum jednej vzorky vo viacerých bodoch

Z grafu je zrejmé, že vzorka prepúšťa rovnaké spektrum v celkom rozsahu a tým pádom môžeme potvrdiť, že vzorky majú homogénnu vrstvu a tým pádom aj ich optické vlastnosti na celej

ploche môžeme považovať za konštantné. Tento fakt potvrdil kvalitu výroby v danej firme čo sa týka nanášania tenkých kovových vrstiev na rovný substrát, v tomto prípade teda polykarbonát.

Toto meranie výrazne uľahčilo ďalšie merania optických vlastností vzoriek, pretože bude stačiť meranie vzorky v jednom bode a bude sa považovať takáto nameraná hodnota za dôveryhodnú a presnú v po celej ploche vzorky.

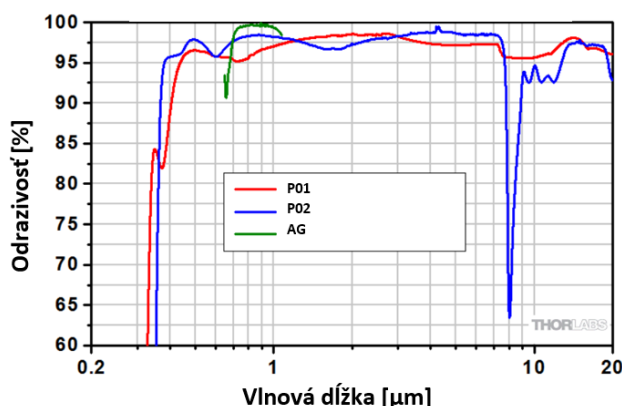
3.4 Merania spektrálnej odrazivosti

Pri meraní spektrálnej odrazivosti vo viditeľnom spektre je dôležitá referenčná vzorka, v mojom prípade bolo použité prioritne postriebrené zrkadlo (obrázok 3.10) z dôvodu vysokej a takmer konštantnej odrazivosti približne od 350 nm. Taktiež bolo použitá referenčná vzorka pozláteného zrkadla, ktorá dosahuje maximálne odrazivosti od vlnovej dĺžky približne 650 nm. Avšak táto pozlátená vzorka nie je vhodná pre použitie ako referenčnej vzorky z dôvodu nízkej odrazivosti v nižších vlnových dĺžkach viditeľného spektra a preto by bolo náročné určiť v týchto spektrách skutočnú odrazivosť meraných vzoriek. Napriek tomu som ju využil k porovnaniu s postriebrenou vzorkou kvôli presnosti meraní a k overeniu kvality referenčnej vzorky striebra.



Obrázok 3.10: *Postriebrené zrkadlo od spoločnosti Thorlabs*

Spoločnosť Thorlabs udáva v dokumentácii aj graf znázorňujúci odrazivosť použitej referenčnej vzorky v širokom spektre (obrázok 3.11). Okrem grafu ponúka aj konkrétne hodnoty odrazivosti na jednotlivých vlnových dĺžkach. Tieto údaje mi pomohli určiť presnú odrazivosť jednotlivých vzoriek.



Obrázok 3.11: *Spektrálna odrazivosť postriebrenej referenčnej vzorky*

Referenčná vzorka bola typu PF30-03-P01 a jej odrazivosť sa pohybuje vo viditeľnom spektre na približnej hodnote 97 %. Ďalšie zariadenia potrebné k meraniu spektrálnej odrazivosti sú zdroj svetla,

ktorý v mojom prípade je už spomínaný halogénový zdroj LS-1-LL a spektrometer USB 4000. Schéma meracieho pracoviska je znázornená na obrázku 3.12. Pred meraním jednotlivých vzoriek bolo potrebné v správnom uhle nastaviť zdroj, referenčnú vzorku a zároveň detektor, v tomto prípade je potrebné zdroj a aj detektor nasmerovať na postriebrené zrkadlo pod uhlom 45 stupňov. V programe SpectraSuite som si pred zapnutím zdroja odčítal šum, ktorý je spôsobený svetlom na meracom pracovisku, prípadne šumom na detektore. Po zapnutí zdroja sa odrazené svetlo z referenčnej vzorky zobrazilo v programe SpectraSuite ako spektrum, ktoré som nastavil ako referenčné a následne som nastavil v programe režim Reflectance.



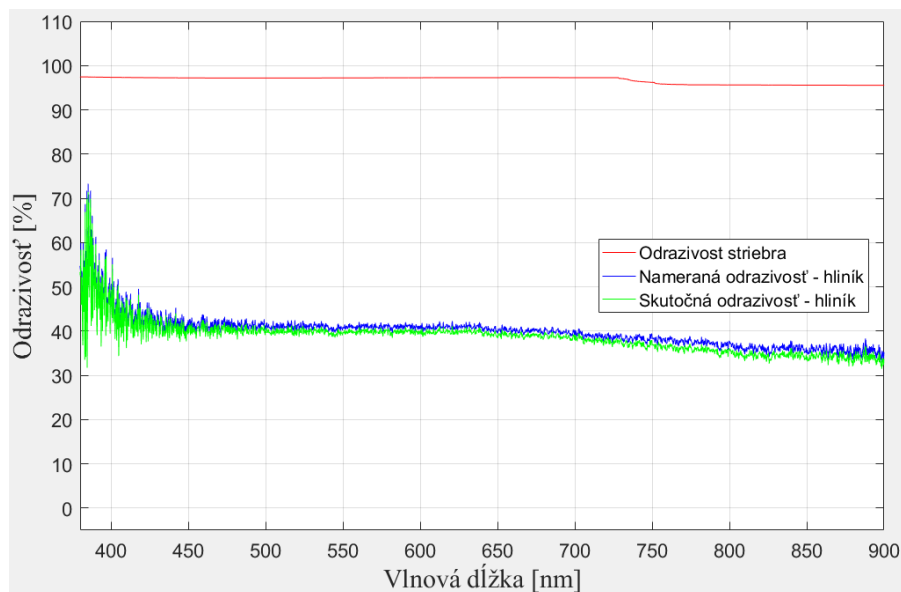
Obrázok 3.12: Meracie pracovisko spektrálnej odrazivosti vzoriek a meraná referenčná vzorka striebra

V grafe sa znázornila odrazivosť referenčnej vzorky postriebreného zrkadla vo viditeľnom spektre na hodnote 100 %. Ako bolo spomenuté, skutočná odrazivosť referenčnej vzorky je nižšia, preto aj odrazené spektrum jednotlivých vzoriek bolo potrebné dopočítať. K presnému výpočtu som použil jednoduchý vzorec:

$$R_{skut} = \frac{R_{ref}}{100} \cdot R_{meranie} \quad [\%]$$

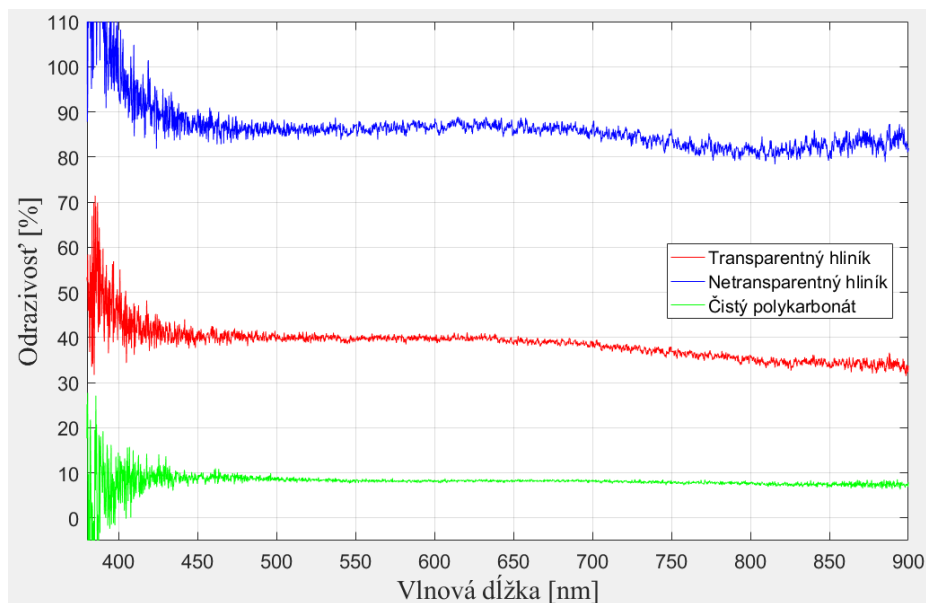
kde R_{skut} je vypočítaná skutočná hodnota odrazivosti na konkrétnej vlnovej dĺžke, R_{ref} je odrazivosť referenčnej vzorky striebra podľa udávajúcich hodnôt od výrobcu a $R_{meranie}$ je aktuálna (nepresná) odrazivosť vzorky.

Po tomto nastavení som nahradil referenčnú vzorku striebra za dodané vzorky a rovnakým spôsobom som meral ich spektrálnu odrazivosť. Takýmto spôsobom som postupoval aj u prvých vzorkách dodaných firmou, na obrázku 3.13 je zobrazená transparentná vzorka hliníka.



Obrázok 3.13: *Spektrálna odrazivosť referenčnej vzorky a tenkej vrstvy hliníka*

Na grafe je zobrazená spektrálna odrazivosť referenčnej vzorky podľa údajov výrobcu. Ďalšie dve krivky ukazujú rozdiel medzi nameranou odrazivosťou vzorky tenkej vrstvy hliníka a dopočítanou odrazivosťou tej istej vzorky. V ďalších grafov sú zobrazené iba skutočné odrazivosti. Prvými meranými vzorkami boli vzorky pokovené hliníkom a taktiež čistá vzorka polykarbonátu bez pokovenia.

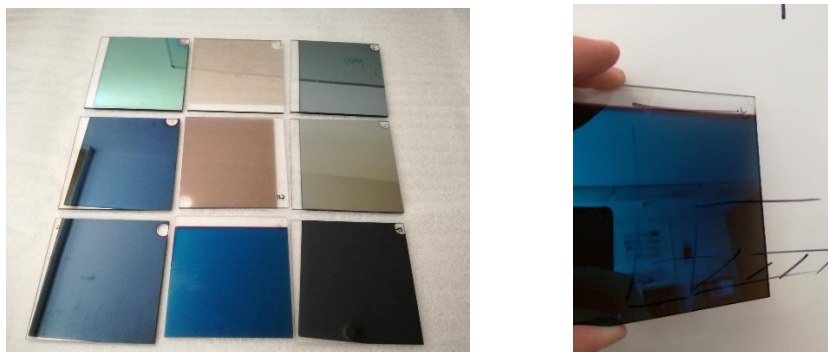


Obrázok 3.14: *Spektrálna odrazivosť vzoriek pokovených hliníkom a čistého polykarbonátu bez pokovenia*

Odrazivost' polykarbonátu bez pokovenia sa pohybuje na hodnote 9 %, čo odpovedá teoretickým vlastnostiam tohto materiálu. Prvá vzorka hliníkovej vrstvy je transparentná a jej odrazivosť sa na viditeľnom spektre pohybuje na hodnote približne 40 %. Druhá vzorka hliníkovej vzorky už je netransparentná a jej odrazivosť sa približuje k referenčnej vzorke striebra k hodnote 90%. Odrazivosti

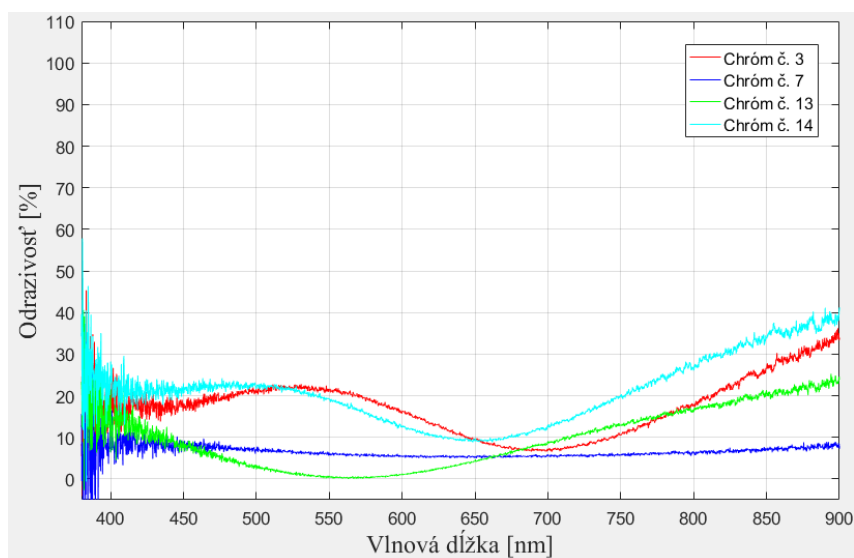
týchto dvoch vzoriek a taktiež čistého polykarbonátu môžeme považovať za konštantné v celom rozsahu viditeľného spektra.

Ďalším kovovým materiálom naneseným na polykarbonátový substrát bol chróm. Ako bolo spomenuté v teoretickej časti, chróm je pri určitých podmienkach výroby farebný. Na obrázku 3.15 sú vybrané niektoré vzorky chrómu dodané firmou.



Obrázok 3.15: *Vľavo: Niekoľko typov pokovených vzoriek chrómom, vpravo: polopriepustná vzorka tenkej vrstvy chrómu na PC substráte*

Tieto vzorky majú taktiež farebné odtiene, na pohľad je vidieť čiernu netransparentnú vzorku, svetlú aj tmavo zelenú vzorku, modré vzorky aj jemne červené transparentné vzorky. Na obrázku 3.15 je detailný pohľad na modrú transparentnú vzorku pokovenú chrómom. Výsledky spektrálnej odrazivosti vybraných vzoriek sú zobrazené na obrázku 3.16.



Obrázok 3.16: *Spektrálna odrazivosť vzoriek pokovených chrómom*

Čo sa týka nasledujúcich vybraných vzoriek pokovených chrómom, je z grafu jasne vidieť, že dochádza k interferenciám odrazeného svetla. Napríklad u vzoriek č. 3 a č. 14 dochádza k viditeľnej interferencii, keď pri dopade svetla na vzorku č. 3 odráža iba približne 8 % svetla v oblasti 680 nm a naopak zvýšená odrazivosť je v okolí 525 nm a to približne 22 %. Podobná situácia nastáva aj u vzorky č. 14, kde maximálnu odrazivosť 23 % dosahuje vzorka v oblasti 475 nm a naopak minimálnu odrazivosť dosahuje v oblasti 650 nm a to približne 10 %. Vzorka č. 13 úplne eliminuje odrazené svetlo

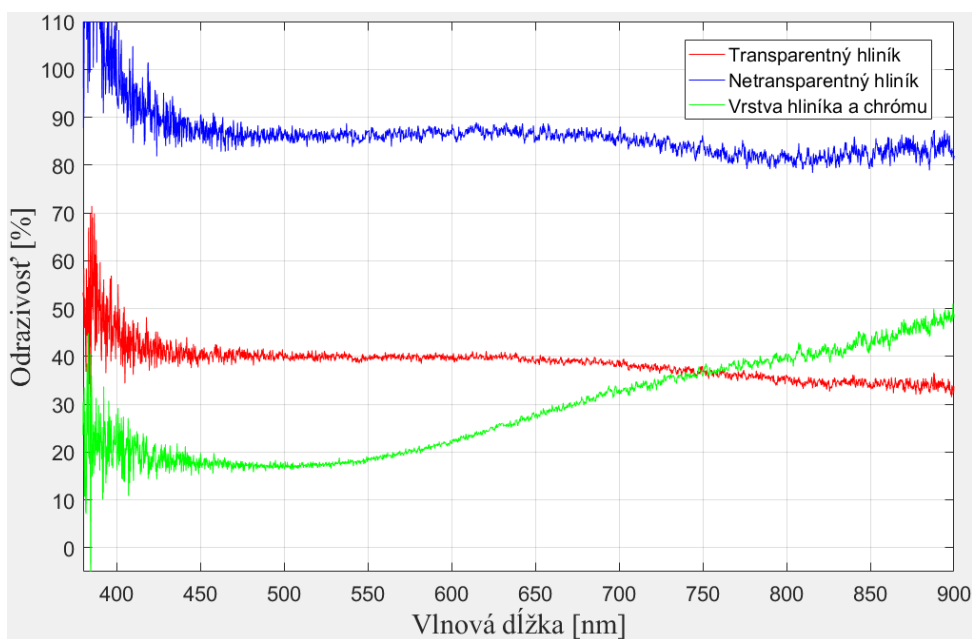
na vlnových dĺžkach v okolí 560 nm a odrazivosť sa lineárne zvyšuje do nižších aj do vyšších vlnových dĺžok. Vzorka č. 7 si zachováva odrazové vlastnosti konštantné takmer po celom viditeľnom spektre a to približne 8% na nižších vlnových dĺžok a mierne klesá približne na 6 % pri vlnovej dĺžke 700 nm.

Jednou zo vzoriek bola aj vzorka z dvoch vrstiev a to hliníku a chrómu, ako je zobrazené aj na obrázku 3.17. Zloženie vrstiev je rovnaké ako na obrázku 3.7.



Obrázok 3.17: Vzorka pokovená hliníkom a chrómom

Na obrázku 3.18 je zobrazené grafické porovnanie transparentnej vzorky hliníku a vzorky pokovenej najprv hliníkom a následne chrómom.



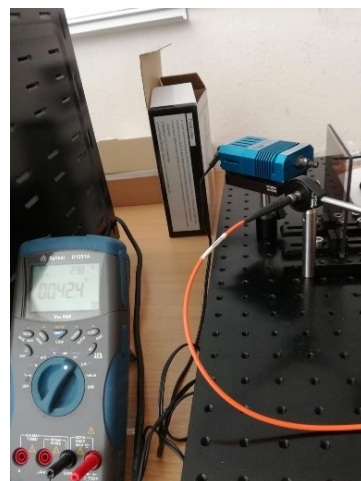
Obrázok 3.18: Spektrálna odrazivosť vzoriek pokovených hliníkom a pokovená hliníkom a zároveň chrómom

Chrómová vrstva, použitá ako druhá vrstva na vzorke, vykazovala 50% odrazivosť, pokiaľ sa jednalo o jedinú vrstvu na polykarbonátovom substráte. Na grafe je zobrazený transparentný hliník, ktorý dosahuje odrazivosť približne 40 %. Na takúto istú vzorku transparentného hliníka bola nanesená vrstva chrómu. Teda sa jedná o zloženie polykarbonátového substrátu, tenkej vrstvy hliníka a tenkej vrstvy chrómu. Odrazivosť takejto vzorky je zobrazená na grafe zelenou krivkou, v celkom rozsahu viditeľného spektra je odrazivosť vzorky nižšia ako u transparentného hliníka, pohybuje sa približne na

hodnote 20 % a od vlnovej dĺžky 550 nm začína odrazivosť lineárne stúpať a na hodnote 750 nm dosahuje táto vzorka vyššiu odrazivosť ako spomínaný transparentný hliník.

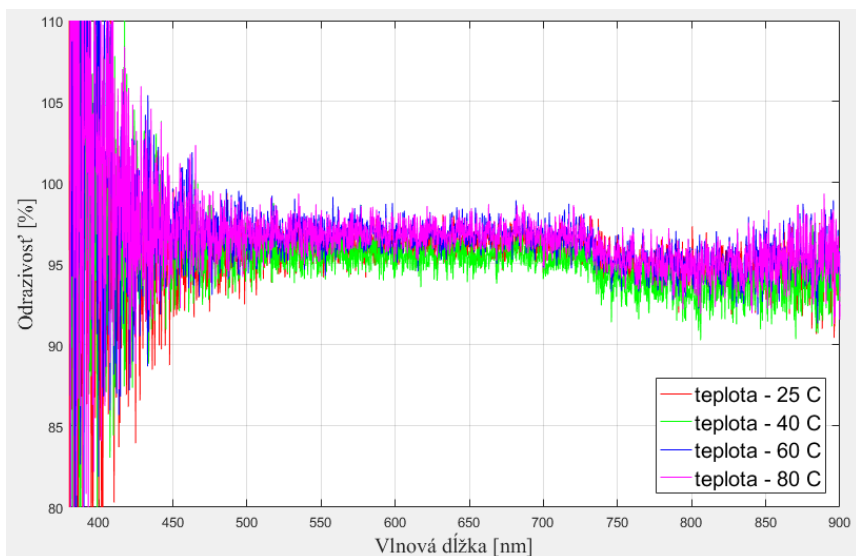
3.5 Merania spektrálnej odrazivosti pri teplotnom zaťažovaní

V druhom type merania bol meraný ten istý parameter ako v predchádzajúcej kapitole, teda meranie spektrálnej odrazivosti, avšak pri teplotnom zaťažovaní vzorky. V tomto prípade som teplotne zaťažoval vzorky až do teploty 80 °C. Vzorky som najprv nahrial v trúbke na teplotu približne 100 °C ako je zobrazené na obrázku 3.19. Teplota 100 °C by podľa teoretických poznatkov nemala mať žiadny výrazný vplyv na tvar a štruktúru polykarbonátu.



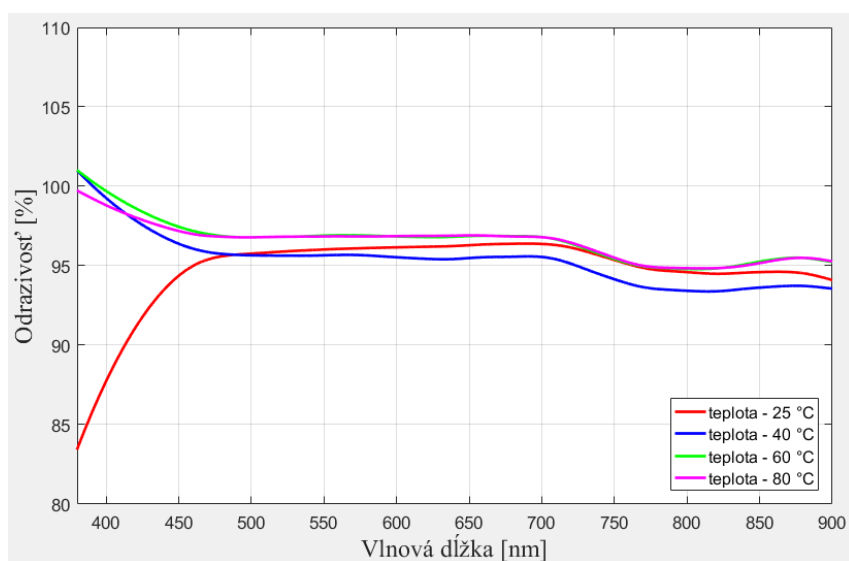
Obrázok 3.19: Meracie pracovisko teplotného zaťažovania vzoriek

Pri zahrievaní sa koniec teplomera dotýkal priamo vzorky, takže teplota vzorky bola presná. Po dosiahnutí teploty 100 °C som vzorku vybral a upevnil na mechanický držiak. Medzi týmto procesom klesla teplota o približne 15 °C, takže teplotu som začal merať až od hodnoty 80 °C. Odrazené spektrum som si značil pri teplote vzoriek 80 °C, 60 °C, 40 °C a 25 °C, posledná hodnota predstavovala pokojovú teplotu v miestnosti. Tieto výsledky som previedol do grafu a porovnal som odrazené spektrá vzorky pri jednotlivých teplotách. Na obrázkoch sú zobrazené grafy nepriepustného hliníka, transparentného hliníka a vzorka chrómu č. 24.



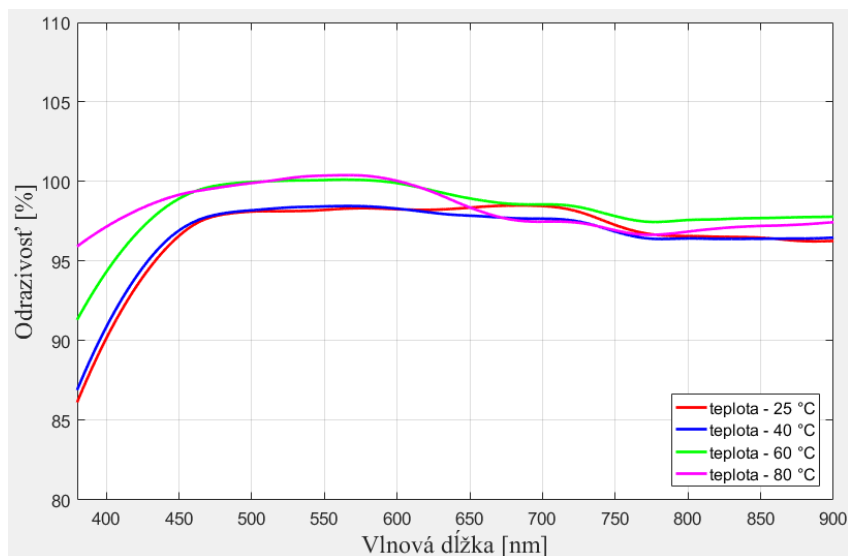
Obrázok 3.20: Graf zobrazujúci spektrálnu odrazivosť pri zaťažovaní vzorky pokovenej hliníkom

Keďže na grafe je percentuálny rozdiel veľmi ťažko určiť, použil som v programe Matlab vyhladzovací algoritmus pre vyhladenie kriviek. Výsledky z grafu (obrázok 3.20) sú zobrazené na ďalšom grafe (obrázok 3.21).



Obrázok 3.21: Graf zobrazujúci spektrálnu odrazivosť pri zaťažovaní vzorky pokovenej hliníkom pri vyhladených dátach

Z grafu je zrejmé, že teplotné zaťažovanie vzorky s hliníkovým pokovením nevyplýva na spektrálne odrazové vlastnosti danej vzorky, keďže zmena odrazivosti sa pohybuje maximálne do 2 % vo viditeľnom spektre. Potvrďuje sa teda teplotná stabilita vzorky až do 80 °C. Ďalšie teplotné zaťažovania boli prevedené aj na ostatných vzorkách chrómu. Na obrázku 3.22 sú zobrazené taktiež odrazové vlastnosti, tento krát chrómovej vzorky č. 24.

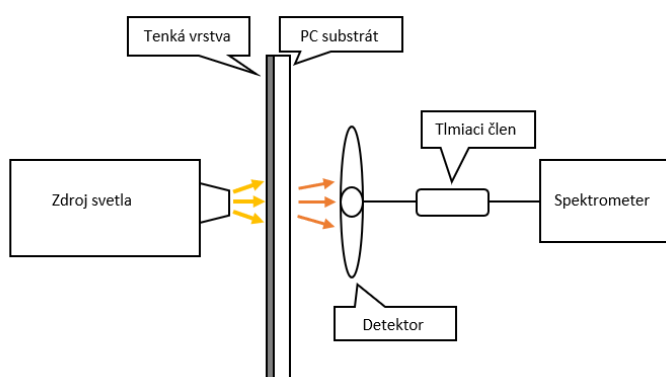


Obrázok 3.22: Graf zobrazujúci spektrálnu odrazivosť pri zaťažovaní vzorky pokovenej chrómom

Rovnaké teplotné zaťaženia boli vykonané aj na vzorkách pokovených chrómom. Podobne ako u vzorkách pokovených hliníkom, aj tenké vrstvy chrómu nevykazujú žiadnu výraznú zmenu spektrálnej odrazivosti pri zahrievaní vzorky.

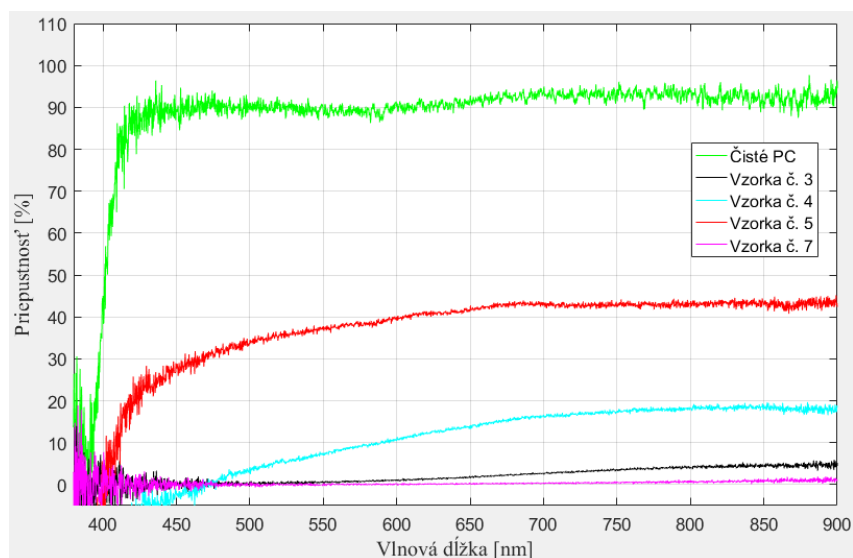
3.6 Merania priepustnosti transparentných vzoriek

Ďalším meraním bolo meranie priepustnosti transparentných vzoriek. Pred meraním vzoriek som si zdroj svetla a „detektor“ nastavil tak, aby boli kolmo na seba a teda aby maximálny výkon zo zdroja dopadal na „detektor“. Keďže bol spektrometer v saturácii, bolo potrebné do optickej trasy pridať optický člen na reguláciu množstva prechádzajúceho svetla vláknom. Po odstránení saturácie som nastavil referenčnú hodnotu priepustnosti, čiže priepustnosť svetla bez vzorky bola nastavená na 100 %. Po tomto nastavení som pridal vzorku medzi zdroj a „detektor“ a zmeral výslednú hodnotu priepustnosti (obrázok 3.23).



Obrázok 3.23: Vľavo: schéma merania priepustnosti, vpravo: meracie pracovisko merania priepustnosti

Vo výsledkoch a v grafoch sú zahrnuté iba transparentné vzorky, u netransparentných vzorkách nedochádza k žiadnemu prepustenému svetlu, teda ich priepustnosť sa rovná 0 %. Na ďalšom grafe (obrázok 3.24) sú zobrazené niektoré vzorky pokovené chrómom a vzorka čistého PC bez pokovenia a ich vlastnosti priepustnosti svetla.



Obrázok 3.24: Grafické znázornenie priepustnosti niektorých vzoriek

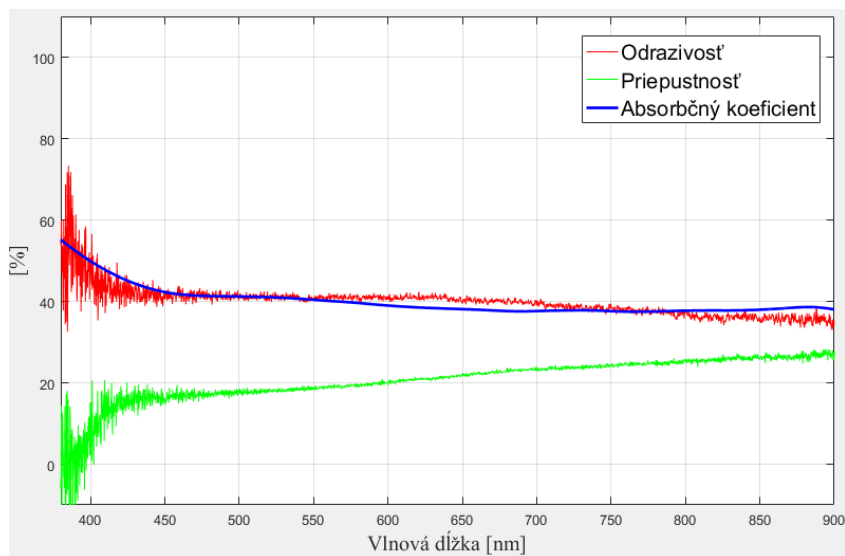
Čo sa týka priepustnosti daných vzoriek, potvrdilo sa že vzorka bez vrstvy, teda čistý polykarbonát je najtransparentnejším materiálom a dosahuje priepustnosť 89 % až 94 %. Znižovanie priepustnosti je možné pozorovať na rozhraní viditeľného spektra a UV spektra, kde priepustnosť prudko klesá až k 0 % a teda tento materiál neprepúšťa vlnové dĺžky v UV spektre. Čo sa týka vzoriek pokovených chrómom, nenastáva tu žiadna výrazná interferencia, vzorka č. 5 vykazuje najvyššiu priepustnosť zo všetkých vzoriek a to je zhruba od 30% na najnižších vlnových dĺžkach viditeľného spektra až po 43 %. Vzorka č. 4 vykazuje nižšiu priepustnosť, aj keď neprepúšťa svetlo v modrej spektrálnej oblasti, na najvyšších vlnových dĺžkach viditeľného spektra dosahuje odrazivosť 18 %. Vzorka č. 3 prepúšťa len minimum svetla, maximálna priepustnosť nepresahuje 5 %. Posledná vzorka č. 7 je nepriepustná a to v celkom viditeľnom spektre.

3.6.1 Výpočet absorpcie

Pokiaľ poznáme odrazivosť a priepustnosť, dokážeme určiť aj približnú absorpciu danej vzorky. Použijeme na to vzťah ($A+R+T=I$). Keďže som zisťoval absorpciu, upravil som vzorec na:

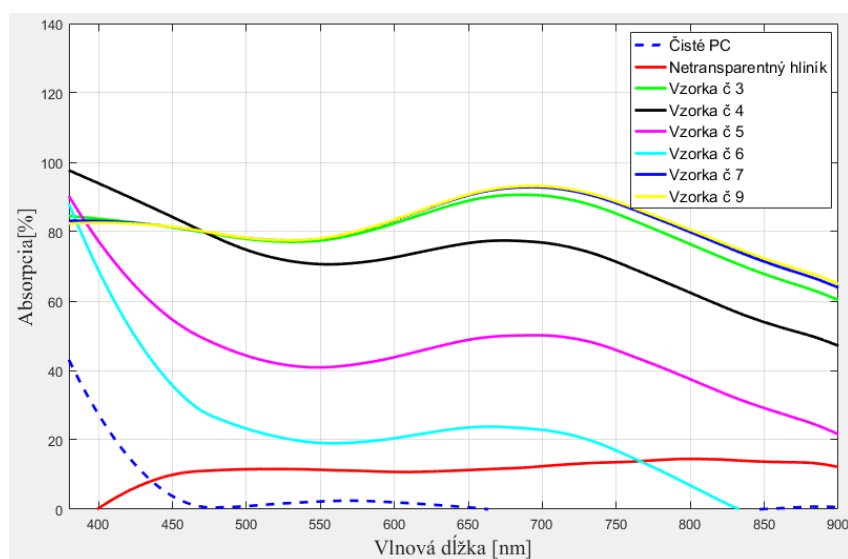
$$A = 1 - R + T$$

K výpočtu absorpcie v celom meranom rozsahu spektrálneho žiarenia som použil program MATLAB a následne som graficky znázornil absorpciu jednotlivých vzoriek. Krivku absorpčného koeficientu som pre prehľad vyhladil v danom programe a teda hodnota sa môže mierne líšiť od skutočnej hodnoty a to hlavne z dôvodu určitého šumu pri meraní. Na obrázku 3.25 je zobrazená odrazivosť, priepustnosť a teoretický absorpčný koeficient vzorky transparentného hliníku.



Obrázok 3.25: Grafické znázornenie odrazivosti, priepustnosti a absorpcie

Podľa grafického znázornenia je zrejmé, že absorpcia transparentnej vzorky tenkej vrstvy hliníka sa pohybuje vo viditeľnom rozsahu v okolí 40 %. Ďalšie absorpčné koeficienty vzoriek, ktoré boli spomenuté v predchádzajúcich meraniach sú znázornené v grafe 3.26.



Obrázok 3.26: Absorpčné spektrum niekoľkých vzoriek

Z grafu vyplýva, že najmenej svetla absorbuje práve čistý polykarbonát bez tenkej vrstvy, čo aj potvrdilo teoretické poznatky. U tohto materiálu sa absorpcia vo viditeľnom spektre sa približuje k nulovej hodnote, je nutné pripomenúť, že percento absorpcie nemôže byť nižšie ako 0 %, a je nutné brať do úvahy možnú odchýlku. Materiál tenkej vrstvy, ktorý absorbuje taktiež veľmi nízke percento svetla je práve netransparentná vrstva hliníka, v tomto prípade sa jedná o absorpciu približne 10-12 % v celkom rozsahu viditeľného spektra.

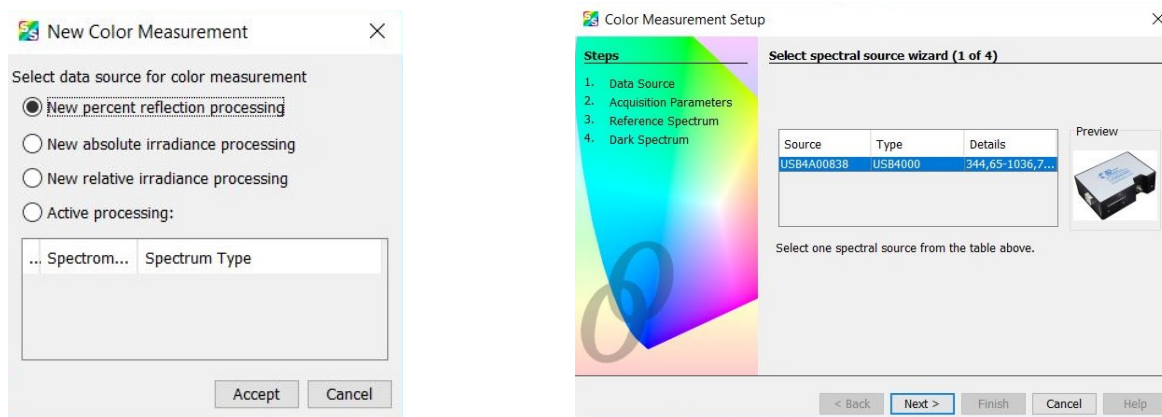
V prípade chrómových tenkých vrstiev ide o veľké zmeny pri jednotlivých vzorkách. Napríklad vzorky č. 3 a č. 7, ktoré sú ale taktiež netransparentné, dosahujú absorpciu v rozmedzí 80 % až takmer

90 % v závislosti od vlnovej dĺžky. Najnižšiu absorpciu z chrómových vzoriek dosahuje vzorka č. 6, ktorá je netransparentná a jej absorpcia sa vo väčšej časti viditeľného spektra pohybuje na úrovni 20 %.

3.7 Meranie chromatičnosti

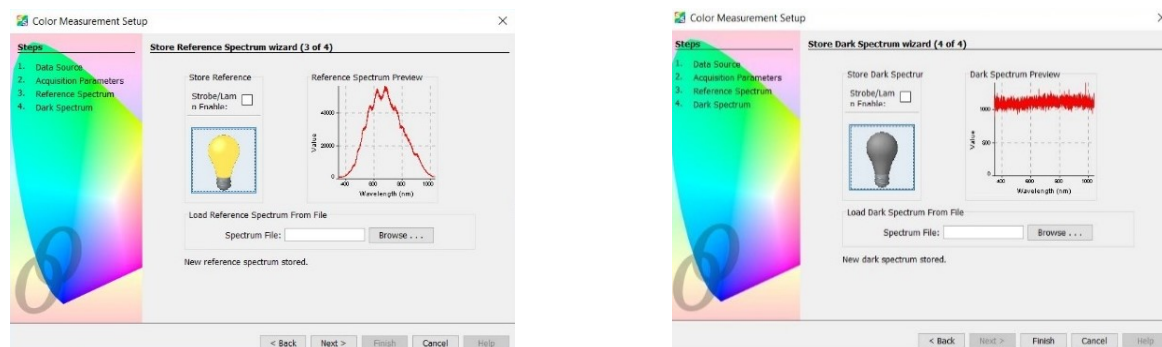
Ako bolo napísané v kapitole (farby v automotive), okrem iných noriem a predpisov je potrebné zachovať správnu farebnú oblasť pre rôzne funkcie automobilových lúčov. Aj napriek správneho zdroju svetla je možné, že sa farba tohto zdroja môže meniť a to napríklad pri odraze v prípade netransparentných materiálov alebo pri priepustnosti v prípadne transparentných materiálov. Z tohto dôvodu stojí za zmienku zmerať vplyv pokovených vrstiev dodaných firmou a overiť tak možné zmeny chromatičnosti.

Meranie chromatičnosti prebiehalo pri rovnakom zapojení ako to bolo v prípade merania spektrálnej odrazivosti (obrázok 3.27). Rovnako sa použila aj referenčná vzorka striebra, pretože pri dopade na túto referenčnú vzorku sa nemení výrazne teplota chromatičnosti odrazeného svetla. Následne som si nastavil v režime New Color Measurements možnosť New percent reflection processing a následne vybral zapojený spektrometer USB4000.



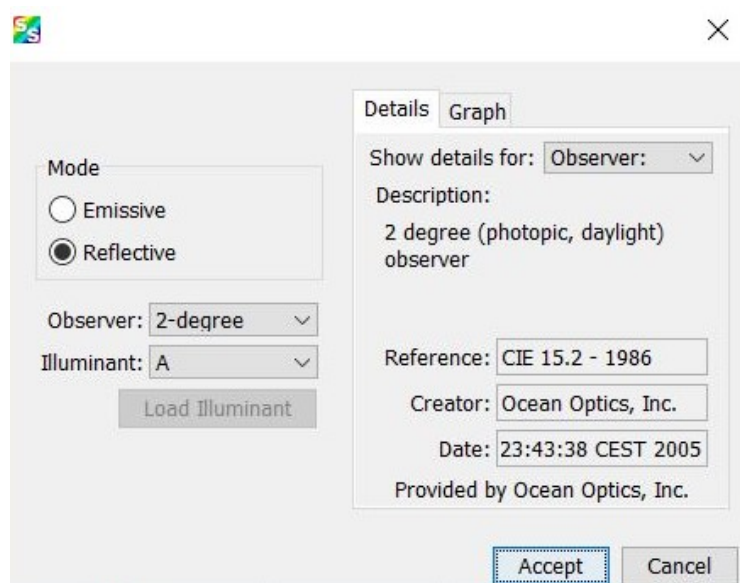
Obrázok 3.27: Voľba merania chromatičnosti a výber spektrometra

Následne som nastavil vhodnú intenzitu svetla dopadajúceho na detektor, to bolo riešené regulátorom intenzity svetla. Po správnom nastavení intenzity som si uložil túto hodnotu ako referenčnú a v ďalšom kroku som zakryl zdroj svetla, takže na spektrometri bol aktuálne iba šum a ten som odpočítal od referenčnej hodnoty (3.28).



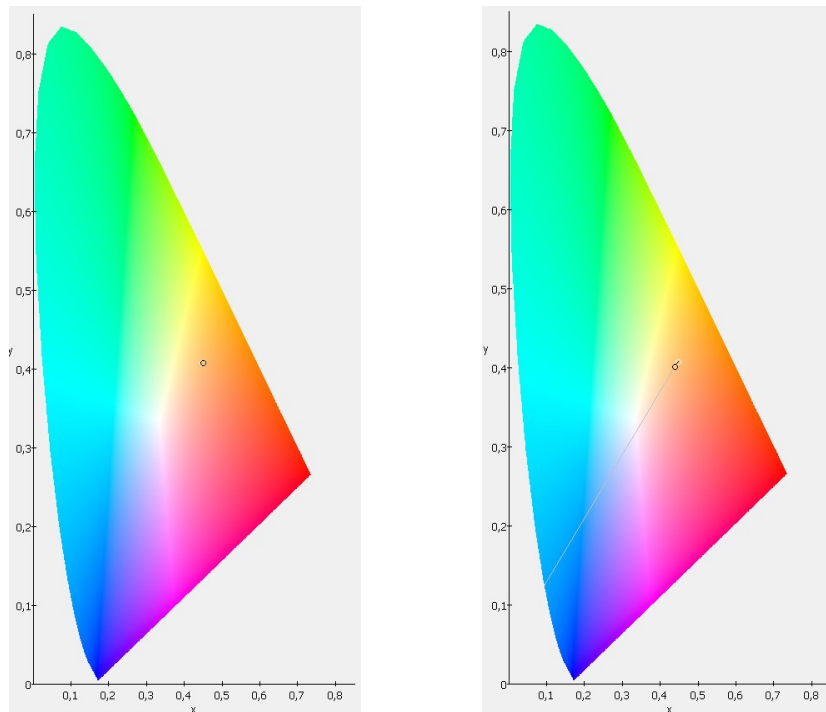
Obrázok 3.28: Nastavenie referenčnej hodnoty a šumu spektrometra

V poslednom kroku vyžadoval program nastavenie zdroja, v časti Illuminant som zvolil možnosť A, ktorá definuje osvetľovanie v teplote chromatičnosti 2855 K, takmer rovnakú hodnotu má aj používaný halogénový zdroj.



Obrázok 3.29: Nastavenie teploty svetelného zdroja

Prvými meranými vzorkami boli tenké vrstvy hliníku, výsledky sú zobrazené na chromatickej mape (3.30) a následnej aj v tabuľke (3.1).



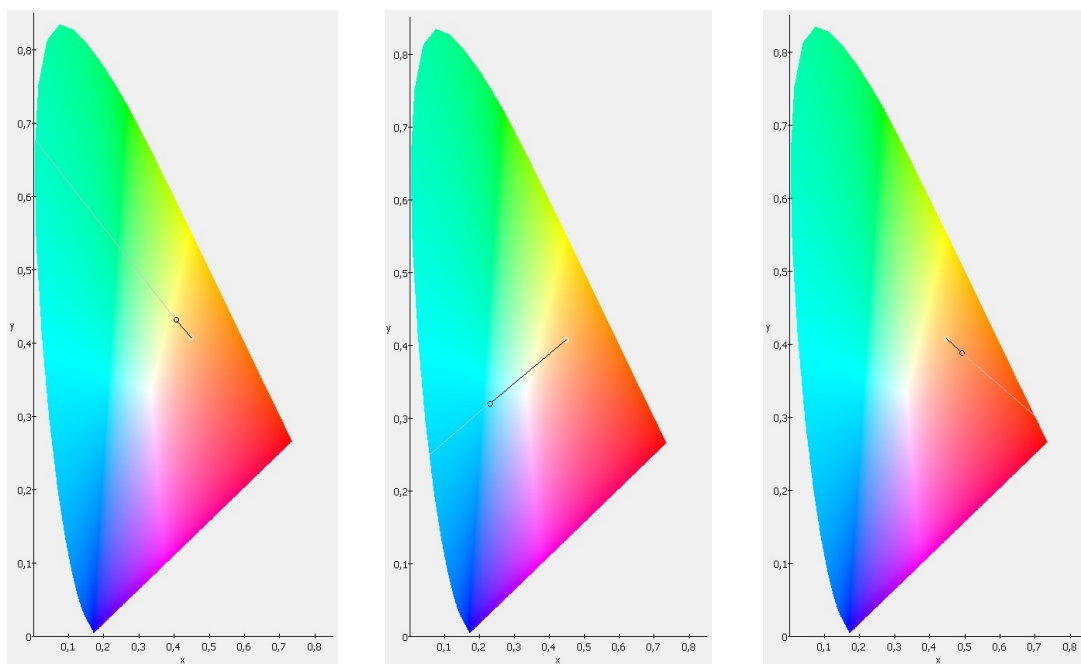
Obrázok 3.30: Vľavo: chromatická mapa odrazeného svetla netransparentného hliníka; Vpravo: chromatická mapa odrazeného svetla transparentného hliníka

Tabuľka 3.1: Tabuľkové znázornenie dvoch vzoriek hliníka

Vzorka	x	y	z	CCT [K]
Netransparentný hliník	0,45	0,40	0,14	2823
Transparentný hliník	0,44	0,40	0,16	2917

Z výsledkov je možné potvrdiť fakt, že odrazené svetlo od hliníkových vrstiev si zachováva svoju chromatickú teplotu. Pri transparentnom hliníku sa teplota posunula približne o 100 K k teplejším farbám, táto zmena nie je výrazná. Hliník môžeme teda považovať za podobný striebru, čo sa týka chromatičnosti.

Ďalšími meranými vzorkami boli vzorky pokovené tenkou vrstvou chrómu. Niektoré zo vzoriek sú zobrazené na grafe a tabuľke.



Obrázok 3.31: Vľavo: chromatická mapa odrazeného vzorky č. 3; v strede: chromatická mapa odrazeného svetla vzorky č. 4; vľavo: chromatická mapa odrazeného svetla vzorky č. 5

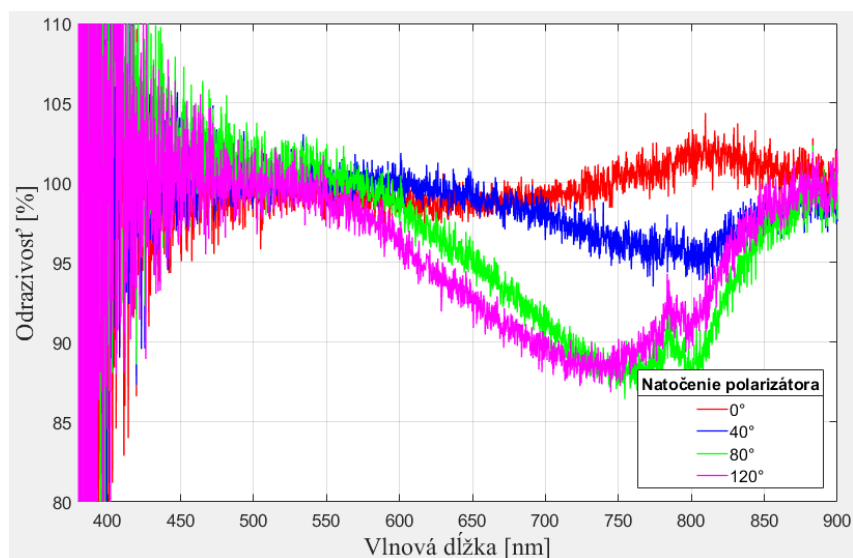
Tabuľka 3.2: Tabuľkové znázornenie vzoriek chrómu

Číslo vzorky	x	y	z	CCT [K]
3	0,40	0,43	0,16	3791
4	0,23	0,32	0,45	13311
5	0,49	0,39	0,12	2125

Vzorky pokovené tenkou vrstvou chrómu vykazujú oveľa vyššie zmeny chromatickej teploty. Na grafe a tabuľke sú zobrazené vzorky č. 3, č. 4 a č. 5. Výsledky sa výrazne líšia od chromatickej teploty referenčného vzorku striebra. V prípade vzorky č. 4, ktorá má odtieň modrej farby sa chromatická teplota odrazeného svetla pohybuje v silne studených farbách na hodnote až 13311 K. Naopak vzorka č. 5 vykazuje zmenu k teplejším odtieňom, opticky sa javí vzorka jemne do červena a jej odrazené svetlo nadobúda teplotu na hodnote 2125 K.

3.8 Polarizačné merania

Posledným meraním bolo meranie spektrálnej odrazivosti pri zmene polarizácie. Prirodzené svetlo je možné chápať ako kompozíciu dvoch lineárne ortogonálnych polarizovaných svetiel. Keďže jedným zo spôsobov, ako polarizovať svetlo je odrazom na dielektrickom materiáli, v tomto prípade sa jedná o odraz svetla od tenkej kovovej vrstvy a následne odraz na dielektrickom materiáli. Z tohto dôvodu boli prevedené experimentálne merania vplyvu polarizácie na odrazené svetlo. Na grafe (obrázok č. 3.32) je zobrazené chovanie svetla pri natáčaní polarizátora pod určitými uhlami.



Obrázok 3.32: Grafické znázornenie spektrálnej odrazivosti pri prechode polarizačným filtrom

Z grafu je zrejmé, že by bolo vhodné týmto efektom podrobnejšie zaoberať, pretože namerané výsledky ukazujú výskyt závislosti na polarizačnom stave svetla prejavuje.

Záver

Táto diplomová práca na začiatku svojej teoretickej časti popisuje svetlo ako elektromagnetické žiarenie a jeho základné vlastnosti. Opisuje základné fotometrické veličiny, následne je tu vysvetlené vnímanie svetla, jeho vyhodnocovanie farieb a teploty chromatičnosti. Ďalej opisuje svetlo ako vlny, takže sú v stručnosti vysvetlené vlnové a Maxwellove rovnice, polarizácia svetla, interferencia a koherencia. Práca sa taktiež venuje svetlu z pohľadu geometrickej optiky, kde sú vysvetlené základné zákony geometrickej optiky a to index lomu, zákon odrazu a lomu svetla na rozhraní dvoch prostredí a v stručnosti opísané správanie svetla pri odraze na kovoch.

V ďalšej teoretickej časti práca stručne popisuje fungovanie tenkých vrstiev, ich technológiu vytváranie tenkých vrstiev. Ďalej opisuje tri základné kategórie tenkých vrstiev z pohľadu optických vlastností. Následne popisuje tri materiály, ktoré sú použité v praktickej časti a to dielektrický materiál polykarbonát a kovové materiály chróm a hliník. Na konci teoretickej časti sú ešte praktické využitia tenkých vrstiev v automobilovom priemysle.

V praktickej časti sa táto práca venuje optickým vlastnostiam tenkých kovových vrstiev na dielektrickom polykarbonátovom substráte. Obsahuje merania 35 vzoriek dodaných spoločnosťou Varroc Lighting Systems s.r.o. Jedná sa o vzorky pokovené hliníkom a chrómom a taktiež aj vzorka dvoch vrstiev hliníka a chrómu. Merané boli základné optické vlastnosti a to spektrálna odrazivosť, priepustnosť, následne vypočítaná absorpcia vzoriek. Ďalšími meranými vlastnosťami bolo meranie teploty chromatičnosti a polarizačné merania. Spektrálna odrazivosť bola meraná tiež pri teplotných zaťažovaniach vzoriek.

Ešte pred meraniami optických vlastností jednotlivých vzoriek bolo potrebné zistiť homogenitu týchto vzoriek, teda či po celej ploche si každá vzorka zachováva rovnaké optické vlastnosti. Merania ukázali, že sa jedná o homogénne nanosené tenké vrstvy a teda ich optické vlastnosti sú konštantné po celej ploche nanesej tenkej vrstvy.

Prvým meraním bolo meranie spektrálnej odrazivosti vzoriek v celkom rozsahu viditeľného spektra vďaka širokospektrálnemu halogénovému zdroju od spoločnosti Ocean Optics. Výsledky ukázali, že vrstva hliníka, ktorá je netransparentná, dosahovala odrazivosti typické pre tento materiál a to približne na hodnote 90 % v celkom viditeľnom spektre. Polopriepustná vrstva hliníka vykazovala odrazivosť 40 %. Výsledky spektrálnej odrazivosti čistého polykarbonátu sa pohybujú na úrovni 10 % a teda je taktiež potvrdená táto vlastnosť pri tomto type materiálu. Výsledky tenkých vrstiev chrómu už nie je možné takto jednoducho interpretovať, keďže u niektorých vzorkách dochádza k interferenciám svetla, teda množstvo odrazeného svetla je závislé na vlnovej dĺžke. V niektorých prípadoch je to rozdiel až 15 % medzi minimálnou a maximálnou odrazivosťou na určitých vlnových dĺžkach.

Tá istá vlastnosť, teda spektrálna odrazivosť bola zmeraná aj v druhom meraní. V tomto meraní sa ale teplotne zaťažovali jednotlivé vzorky. Výsledky ukázali, že vzorky sú teplotne stabilné pokiaľ boli vzorky zohriate na hodnotu 80 °C.

Tretím meraním bola zistená priepustnosť vzoriek. Väčšina vzoriek dosahovala nízke priepustnosti, pokiaľ sa jednalo o priepustné vzorky. Ich priepustnosť sa väčšinou pohybovala v rozmedzí 1 % až 15 % u jednotlivých vzorkách. Najvyššiu priepustnosť podľa predpokladov dosahoval čistý polykarbonát bez pokovenia a to približne 90 %. Medzi vhodné priepustné materiály je

možné použiť vzorku polopriepustného hliníku, ktorého priepustnosť dosahuje hodnotu približne 20 %. Čo sa týka vzoriek pokovených chrómom, relatívne vysoké priepustnosti dosahuje vzorka č. 4 a to približne 35 % a vzorka č. 5, ktorej prepustené svetlo bolo približne 60 %. Je potrebné poznamenať, že priepustnosti sa mierne zvyšovali na vyšších vlnových dĺžkach.

Zistením odrazivosti a priepustnosti jednotlivých vzoriek bolo možné určiť približný absorpčný koeficient. Použitím vzorca a programu v programe Matlab bola táto hodnota dopyčovaná u všetkých vzorkách. Výsledky preukázali, že absorpcia vzoriek sa pomerne výrazne líši.

Predposledným meraním bolo zisťovanie teploty chromatickosti svetla po odraze vzorky. Okrem nich boli zistené aj súradnice na chromatickej mape. Odrazené svetlo od tenkej vrstvy hliníka nemá žiadny výrazný vplyv na zmenu tejto vlastnosti. V prípade tenkých vrstiev chrómu dochádza k výrazným zmenám teploty chromatickosti, či už sa jedná o vyššie teploty alebo naopak nižšie teploty.

Merania potvrdili optické vlastnosti polykarbonátu a netransparentných tenkých vrstiev hliníka. Taktiež sa preukázala teplotná stabilita týchto vzoriek, rovnako aj v prípade tenkých vrstiev chrómu. Čo sa týka optických vlastností chrómových tenkých vrstiev, určenie spektrálnej odrazivosti je náročnejšie ako je to napríklad u tenkých vrstiev hliníka, pretože percento odrazivosti nie je konštantné po celej dĺžke viditeľného spektra, ale dochádza tu k interferenciám. Je dôležité poznať tento fakt pri návrhu optických plôch na konkrétnych svetelných funkciách, pretože napríklad použitie napríklad LED zdroja o určitej vlnovej dĺžke môže mať iné odrazové vlastnosti ako u LED zdroja s inou vlnovou dĺžkou. V prípade priepustnosti nedochádza k žiadnym, resp. k zanedbateľným výkyvom priepustnosti u všetkých vzoriek, použitie takýchto materiálov pri polopriepustných funkciách môže byť teda jednoduchšie na výpočty ako je to pri spektrálnej odrazivosti, avšak priepustnosť väčšiny pokovených vzoriek je príliš nízka a teda výkon zdrojov by musel byť vysoký, pokiaľ by sa takéto polopriepustné plochy použili v hlavných svetelných funkciách.

Vývoj svetelných funkcií v automobilovom priemysle sa za posledné roky výrazne technologicky a taktiež dizajnovovo posunul vpred, preto je možné očakávať ďalšie novinky v tejto oblasti. Rozhodne zaujímavý dizajnový prvok by priniesli farebne pokovené časti vo svetle automobilu. Je možné použiť širokú škálu farieb, je nutné však dodať, že výrobná technológia je nesmierne náročná na výrobu rovnakých odtieňov na zakrivených a nerovných plochách. Pokiaľ by sa o takéto farebné pokovenie plôch vo svetle auta javil záujem, je potrebné poznať optické vlastnosti takýchto vrstiev a ako bolo ukázané v práci, tieto vlastnosti často krát nie sú konštantné v rozsahu viditeľného spektra a svetlo pri odraze týchto plôch reaguje inak, ako je to napríklad pri súčasnom pokovení hliníkom.

Ďalšími témami ohľadom farebného pokovenia v automobilovom priemysle môže byť rozšírenie ďalších farebných vzoriek chrómu, použitie iných substrátom ako napríklad polymetylmetakrylát (PMMA) alebo použitie iných kovových materiálov určených k pokovovaniu, ako napríklad zlato, striebro, atď.

Použitá literatura

- [1] MALÝ, Petr. *Optika*. Praha: Karolinum, 2008. ISBN 978-80-246-1342-0
- [2] ŠTRBA, Anton, Vladimír MESÁROŠ a Dagmar SENDERÁKOVÁ. *Svetlo: vlny, lúče, fotony*. Nitra: Enigma, 2011. ISBN 978-80-89132-83-6
- [3] ŠÍŠKA, Petr. Optoelektronika [online]. 2014 [cit. 10.4.2019] Skripta. VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Katedra telekomunikační techniky.
- [4] HABEL, Jiří. Světlo a osvětlování. Praha: FCC Public, 2013, 622 s. ISBN 978-80-86534- 21-3
- [5] HUB, Michal. Flexibilný světlovod [online]. 2018 [cit. 2019-04-11]. Diplomová práce. VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Katedra telekomunikační techniky.
- [6] VITÁSEK Jan. Optické atmosférické komunikace [online]. 2017 [cit. 2019-04-04]. Skripta. VŠB - Technická univerzita Ostrava, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Katedra telekomunikační techniky.
- [7] KUMMER, Jiří. Studium komunikace mezi vozidly s využitím LED technologií [online]. 2015 [cit. 2019-04-11]. Diplomová práce. VŠB - Technická univerzita Ostrava, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Katedra telekomunikační techniky, 2015.
- [8] FUKA, Josef a Bedřich HAVELKA. *Optika a atomová fyzika: fyzikální kompendium pro vysoké školy*. Praha: Státní pedagogické nakladatelství, 1961.
- [9] MACLEOD, H. A. *Thin-film optical filters*. 4th ed. Boca Raton, FL: CRC Press/Taylor & Francis, c2010. Series in optics and optoelectronics (CRC Press). ISBN 1420073028
- [10] PIEGARI, Angela a François FLORY. *Optical thin films and coatings: from materials to applications*. Cambridge, UK: Woodhead Publishing Limited, 2013. Woodhead Publishing series in electronic and optical materials, no. 49. ISBN 0857095943.
- [11] PODANÝ, P. Tenké vrstvy. http://www.ateam.zcu.cz/tenke_vrstvy_sma.pdf, stiahnuté dňa: 2. 2. 2019
- [12] Günzel Martin, Metody depozice tenkých vrstev [online]. 2013 [cit. 2019-03-26]. Diplomová práce. Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích, Pedagogická fakulta, Katedra aplikované fyziky a techniky.
- [13] Termoplasty [online]. Liberec, 2006 [cit. 2019-04-12]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/stud_materialy/vip/VIP%20PLASTY.pdf
- [14] Přehled technických plastů [online]. [cit. 2019-04-07]. Dostupné z: http://www.feronathysen.cz/cms_dokumenty/ftp-prehled-technickych-plastu.pdf
- [15] DUCHÁČEK, V. Polymery – výroba, vlastnosti, zpracování, použití [online]. 2. vyd. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2006 [cit. 2019-04-08]. ISBN 80- 7080-617-6. Dostupné z: http://vydavatelstvi.vscht.cz/knihy/uid_isbn-80-7080-617- 6/pages-img/001.html

- [16] Plasty pro stavebnictví a architekturu 3 – Polykarbonát (PC) [online]. [cit. 2019-04-10]. Dostupné z: http://www.happymaterials.com/imgs/articles/153-3_3_PC.pdf
- [17] Periodická tabulka. Chrom. . [online]. 2010 [cit. 2019-04-12]. Dostupné z: <http://www.prvky.com/24.html>
- [18] Chrom. Wikipedia: the free encyclopedia. [online]. 2001 [cit. 2019-04-12]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Chrom>
- [19] MUDROCH, O. Chromování. Tvrdé a korosní povlaky. Praha: SNTL, 1959
- [20] Monika Iliašová, Meď, hliník a ich zliatiny v elektrotechnike, [online], 2013 [cit. 2019-04-13]
- [21] Phys. Rev. 132, 1918 (1963) – Optical Properties of Aluminum. Physical Review Journals [online]. Copyright 1963 American Physical Society [cit. 2019-04-11]. Dostupné z: <https://journals.aps.org/pr/abstract/10.1103/PhysRev.132.1918>

Zoznam príloh

Súčasťou diplomovej práce je DVD, ktoré obsahuje všetky namerané výsledky jednotlivých vzoriek dodaných spoločnosťou Varroc Lighting Systems s.r.o..

Adresárová štruktúra priloženého DVD:

1. Zložka – fotografie vzoriek
2. Zložka – merania spektrálnej odrazivosti
3. Zložka – merania priepustnosti
4. Zložka – výpočet absorpcie
5. Zložka – merania teploty chromatičnosti